



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

**MODELAMIENTO EXPERIMENTAL Y EMPÍRICO DE LA DILUCIÓN  
EN BLOCK CAVING**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA**

**LENIN SALVADOR ARANCIBIA GUEVARA**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE COMISIÓN:  
KIMIE SUZUKI MORALES  
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA  
PABLO PAREDES MORALES**

**SANTIAGO DE CHILE  
2021**

# RESUMEN

El método de explotación de Block/Panel Caving considera dentro de sus desafíos evitar o retrasar la entrada temprana de dilución, pues genera un perjuicio económico a los proyectos mineros y está asociada a eventos indeseados como bombeos de barro y finos afectando la seguridad y la continuidad operacional. Es por lo que se han generado una serie de herramientas numéricas y empíricas, que permiten simular el comportamiento de la dilución, con el fin de poder predecirla a largo plazo y evaluar el impacto de diferentes estrategias de control. No obstante, estas herramientas no son capaces de incorporar todas las variables claves que influyen en el comportamiento de la dilución, como la migración de finos, la incorporación de preacondicionamiento, cambios granulométricos, entre otros.

A raíz de lo anterior, el objetivo de esta tesis es identificar y cuantificar el efecto de las principales variables que influyen en la entrada de la dilución, utilizando experimentos en un modelo físico a escala y análisis estadístico de datos mina de las operaciones de Salvador y Andina, ambas pertenecientes a CODELCO.

En el modelamiento físico, se realizan 8 experimentos en un modelo a escala 1:50 con una batea y dos puntos de extracción. Las principales variables de estudio fueron: la relación entre la fragmentación mineral/diluyente, la uniformidad del tiraje y la relación entre la cantidad mineral/diluyente. A partir de los resultados se observó que todas las variables estudiadas influyen en el comportamiento de la dilución, en especial la granulometría del mineral. En particular, al extender la curva granulométrica aumentando el componente fino, es decir, disminuir el  $d_{50}$  y  $d_{10}$ , manteniendo constante el  $d_{100}$  y  $d_{80}$ , se produce una menor migración de finos.

Por otra parte, el análisis de datos mina se basó en la construcción de modelos de regresión logística, los cuales son capaces de determinar el punto de entrada de dilución mediante la evaluación de condiciones de entorno y variables operacionales. Para la construcción y calibración de los modelos se utilizan las bases de datos de la extracción histórica (1994-2011) de las minas El Salvador y Andina. Los modelos predictivos de entrada de dilución utilizan la regresión logística multivariable, que permite el pronóstico de la ocurrencia del fenómeno de la entrada de dilución en base a una serie de variables predictoras. Las variables predictoras resultantes, luego del análisis univariable y multivariable, son: altura de columna in-situ, porcentaje de extracción de columna in-situ, porcentaje de toneladas extraídas uniformemente en 30 días y porcentaje de vecinos con dilución. Los modelos construidos son de buena calidad, con una precisión mayor al 80% en la predicción de la entrada de dilución a nivel de puntos de extracción. Además, los modelos minimizan de forma eficaz los errores asociados al PED (punto de entrada de la dilución) donde se obtienen errores totales del PED (RMSE) menores al 25%. La principal dificultad de esta sección de la investigación es que la base de datos no cuenta con todas las variables claves como: fragmentación, medida de preacondicionamiento, propagación del Caving, entre otras.

Dentro de las variables que tienen relación con el comportamiento de la dilución tanto experimental como empíricamente, está la extracción y la altura de columna de mineral. Se recomienda seguir experimentando con otro tipo de roca, mayor cantidad de granulometrías y estudiar la influencia de la dilución en fenómenos como los bombeos de fino y agua. Además, es clave para las faenas tomar la mayor cantidad y mejorar la calidad de datos, para poder analizar fenómenos en base a ellos.

# ABSTRACT

The Block / Panel Caving mining method has among its main challenges to avoid or delay the early entry of dilution, since it generates economic damage to mining projects and is associated with unwanted events such as inrushes of mud or fines affecting safety and operational continuity. For this reason, a series of numerical and empirical tools have been generated to simulate the behavior of the dilution, in order to be able to predict its behavior in the long term. However, these tools are not capable of incorporating all the key variables that influence the dilution behavior, such as the migration of fines, the incorporation of preconditioning, particle size changes, among others. The objective of this thesis is to identify and quantify the effect of the main variables that influence the dilution entry point. In this work, the effect of variables controlling dilution is studied using experiments in a physical scale model. In addition, statistical analysis of mine data from El Salvador and Andina mine, CODELCO is considered for discussion.

The physical model used in this study correspond to a 1:50 scale model, including a simulated ore column and 2 drawpoints. The main variables considered were: the relationship between the mineral fragmentation / diluent, the uniformity of the extraction and the relationship between the mineral quantity / diluent. Eight experiments were carried out and the relationships between the study variables and the amount of dilution extracted are established. The variables studied influence the behavior of the dilution, especially the granulometry of the mineral, where when extending the grain size curve, that is, decreasing the  $d_{50}$  and  $d_{10}$ , keeping the  $d_{100}$  and  $d_{80}$  constant, produced less migration of fines.

The analysis of mine data was based on the construction of logistic regression models, which were capable of determining the dilution entry point by evaluating environmental conditions and operational variables. For the construction and calibration of the models, the databases of the historical extraction (1994-2011) of the El Salvador and Andina mines, belonging to Codelco, were used. Predictive dilution entry models use multivariable logistic regression, which allows the prediction of the occurrence of the dilution entry phenomenon based on a series of predictor variables. The resulting predictor variables, after univariate and multivariate analysis, were: in-situ column height, percentage of in-situ column extraction, percentage of uniform tonnes extracted in 30 days and percentage of neighbors with dilution. The models built were of good quality, with an accuracy greater than 80% in predicting the dilution input at the extraction point level. Furthermore, the models effectively minimize the errors associated with the DEP (dilution entry point) where total DEP errors (RMSE) of less than 25% were obtained. The main difficulty of this section of the investigation is that the database does not count all the key variables such as: fragmentation, preconditioning measure, Caving propagation, among others.

Among the variables that are related to the behavior of the dilution both experimentally and empirically, is the circulation and the height of the mineral column. It is recommended to continue experimenting with another type of rock, a greater quantity of granulometries and to study the influence of dilution on phenomena such as inrush. In addition, it is key for the tasks to collect the greatest quantity and improve quality of data, in order to analyze phenomena based on them.

# TABLA DE CONTENIDO

1.	1. INTRODUCCIÓN.....	1
	1.1. Preámbulo .....	1
	1.2. Objetivos del estudio.....	2
	1.3. Limitaciones del estudio .....	2
	1.4. Resumen artículos de la tesis .....	3
	1.5. Metodología general del estudio .....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.	Cuantificación de migración de finos en block/panel caving.....	12
4.	Modelamiento de la entrada temprana de la dilución a través de técnicas de regresión ..	28
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
	5.1. Conclusiones .....	43
	5.2. Recomendaciones.....	43
6.	BIBLIOGRAFIA.....	45

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Preámbulo

La minería de Block/Panel Caving ha tenido un aumento importante en producción durante los últimos años, y muy posiblemente esto continúe. Se prevé que la producción mediante el método de Block/Panel Caving aumentará a más de 1 [Mton/día], con los proyectos que entrarán en operación después del año 2020 (Labbé, 2014; Báez, 2016). Esto se debe, entre otras cosas, a normas medioambientales más estrictas que regulan la actividad en distintos países mineros, al aumento de operaciones que pasan por una etapa de transición de explotación vía cielo abierto hacia subterránea, la profundización de los yacimientos, y a la elección de estos métodos, producto de sus bajos costos de operación y altas capacidades productivas.

Debido al aumento esperado en la producción, se hace necesario estudiar los desafíos de la operación mediante block/panel caving, donde uno de los principales es la dilución, es decir, material no económico que es extraído en los puntos de extracción. La dilución corresponde a una parte fundamental de una operación minera de block/panel caving, y su comportamiento desencadena implicancias relevantes para varias etapas de un proyecto minero subterráneo, que van desde la definición de reservas, diseño minero, hasta el control de tiraje y seguridad de la operación. Así, el control de entrada de dilución corresponde a uno de los principales desafíos de la minería por hundimiento, por el alto impacto que genera en términos del beneficio económico y seguridad operacional, implicando muchas veces retornos menores a los esperados por su mala estimación o control inadecuado.

En Chile operaciones mineras como El Salvador y Andina presentan problemas de dilución (Castro & Paredes, 2014), en El Teniente se asocia a bombeos de barro (Castro et al, 2018) y en Cadia East a bombeos de finos. Además, se espera que el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), con una producción en régimen de 140,000 [tpd], pueda verse enfrentado a este problema pues tiene material diluyente sobre la columna in-situ, y también presenta una falla llamada “Falla Oeste” (Codelco Chile, 2009), como se aprecia en la Figura 1, la cual podría generar entrada de dilución lateral (dilución proveniente de un costado del sector productivo) con ley 0%, y en consecuencia graves problemas a la operación.

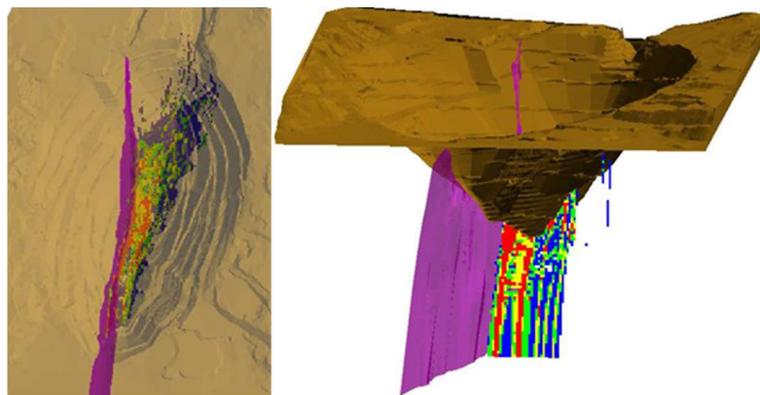


Figura 1: Falla Oeste, PMCHS (Codelco Chile, 2009)

Actualmente, se utilizan una serie de recomendaciones de base empírica y/o parámetros de control operacionales claves para prevenir la temprana entrada de dilución. Entre ellos se encuentran: el ángulo de extracción, el control de tiraje o uniformidad, uso de pilares de control, alturas de extracción parejas, diferencias granulométricas (mineral/diluyente), aplicación de preacondicionamiento, velocidades de extracción (Julin, 1992; Laubscher, 1994; Susaeta, 2004; Sougarret, 2004; Hashim & Sharrock, 2012).

Con el objeto de evaluar y predecir el material diluyente, existen una serie de software que permiten predecir la dilución, como: PCBC (Diering, 2000), Rebop (Cundall et al, 2000) y FlowSim (Castro & Whiten, 2007). Sin embargo, estos métodos están orientados para el largo plazo y una predicción de la ley bajo el marco de la elaboración de un plan de producción.

En consecuencia, en esta tesis se plantea encontrar y cuantificar las variables claves, que permiten predecir el comportamiento de ingreso de dilución a corto y mediano plazo, mediante dos formas: experimentación física en un modelo a escala y mediante análisis de datos de extracción histórica de dos operaciones mineras de block/panel caving.

## **1.2. Objetivos del estudio**

### **Objetivo general**

Identificar y cuantificar el efecto de las principales variables que influyen en la entrada de dilución en un horizonte de corto/mediano plazo, utilizando experimentos en modelo físico a escala y análisis estadístico de datos mina.

### **Objetivos específicos o alcances**

- Determinar las variables operativas y de entorno que influyen en la entrada de dilución.
- Analizar cómo influyen esas variables en la entrada de dilución, mediante experimentación física y modelos de regresión logística.

## **1.3. Limitaciones del estudio**

Este trabajo cuenta con dos tipos de limitaciones. Por un lado, están las limitantes de la experimentación física, y por otro, la del análisis estadístico.

Respecto a los experimentos, se tienen las siguientes limitaciones:

- Los experimentos se realizan en un modelo físico a escala 1:50.
- El modelo físico cuenta con solo una batea con dos puntos de extracción.
- El material ya se encuentra quebrado, es decir, no se cuantifica el efecto de la propagación del caving.
- Los efectos de la carga vertical, humedad y tasa de extracción no fueron considerados en el estudio.

Mientras que las limitaciones del análisis estadístico de datos son:

- Para el desarrollo de este trabajo se considera una base de datos histórica (1994-2011) de las minas El Salvador y Andina recolectados por Codelco. Es importante mencionar como limitación que no existe una validación de los datos en esta base.
- La herramienta escogida para el análisis estadístico es la regresión logística.
- Dado que se analizarán distintos sectores de las minas señaladas, los cuales presentan diferentes condiciones geológicas y de operación, se propondrán modelos multivariados de regresión logística para cada sector.
- Los modelos de regresión logística solo contemplarán las variables que se puedan obtener en la base de datos proporcionada.

## 1.4. Resumen artículos de la tesis

### Art. 1. Modelamiento experimental del ingreso de dilución en block/panel caving debido a la migración de finos

Estado publicación: En construcción para enviar a revista International Journal of Rock Mechanics of Mining Sciences.

Autores previstos: Lenin Arancibia, Raúl Castro, Rene Gómez.

### Art. 2. Modelamiento de la entrada temprana de la dilución a través de técnicas de regresión

Estado publicación: Publicado en U-Mining 2018

Autores: Lenin Arancibia, Raúl Castro, María Elena Valencia, Marcos Cifuentes.

## 1.5. Metodología general del estudio

La propuesta de tesis se basa en dos etapas, una de experimentación con modelo físico a escala y otra de análisis de datos mina. La justificación de estas dos etapas complementarias en el estudio del comportamiento de la dilución es que permiten estudiar más variables y/o comprobar su importancia. A continuación, se detalla cada una de las etapas.

- a) El análisis experimental se basa en estudiar una serie de variables en un modelo de una batea con dos puntos de extracción, a una escala 1:50. La metodología de los experimentos se resume en la Figura 2.

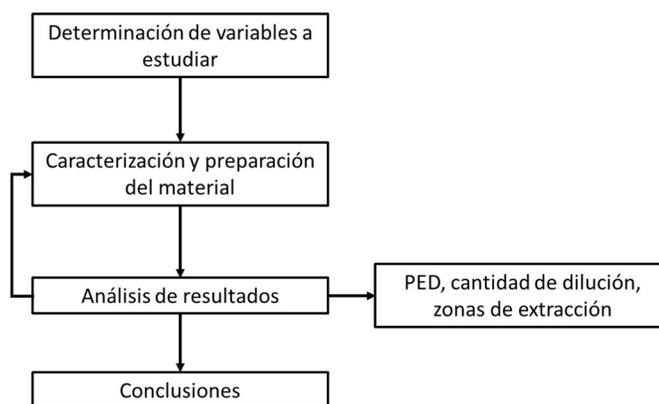
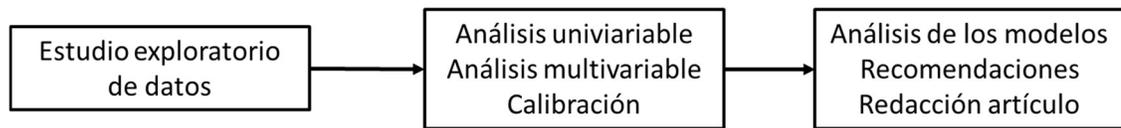


Figura 2: Resumen metodología experimentación física

b) El análisis estadístico se basa en la construcción de modelos de regresión logística, utilizando una base de datos histórica (1994-2011) de las minas El Salvador y Andina, de Codelco, con un enfoque en el corto plazo (mensual) y con resultados esperados mejores a las herramientas actuales, donde se puedan definir variables operacionales y de entorno que permitan predecir el comportamiento de la dilución y dar recomendaciones operacionales que disminuyan el impacto del fenómeno en el negocio.

Los pasos para la construcción y validación de los modelos son: análisis exploratorio de la base de datos y construcción de variables, análisis de regresión logística univariable, análisis de regresión logística multivariable y construcción de modelos, calibración, validación y análisis de los modelos, comparación de modelos con herramientas de simulación de flujo, analizar recomendaciones operacionales para evitar la ocurrencia del fenómeno de entrada de dilución. Esta metodología se muestra en la Figura 3.



*Figura 3: Metodología análisis de datos*

# CAPÍTULO 2

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El block/panel caving es un método de bajo costo y alta productividad, y cuya eficiencia recae en el uso de la gravedad para generar el quiebre y el movimiento de gran cantidad de roca quebrada hacia un nivel de producción. La forma en que se lleve a cabo la extracción impacta directamente tanto la recuperación del material de interés, como en la entrada de material diluyente en las unidades de extracción (Brown, 2004).

Debido a lo anterior, muchos autores (DeWolfe 1981, Julin 1992, Laubscher 1994, Susaeta 2004, Castro & Paredes 2014, Irribarra 2014, Vergara 2016) han estudiado el comportamiento del flujo gravitacional y de su relación con la entrada de dilución. del objetivo de esta sección es resumir el estado del arte existente en relación con este tema.

### 2.1. Teoría del comportamiento de la dilución

Una de las claves para poder entender el comportamiento de la dilución es establecer las variables determinantes que producen su ingreso. Una de las variables más importante es el control de la extracción, diversos autores han postulado formas de poder controlar la extracción para evitar la dilución. DeWolfe (1981), plantea que es esencial una extracción tal que el espacio vacío que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea propicio para la propagación de la fragmentación de material in-situ, sin que el volumen permita el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado, como se puede apreciar en la Figura 4.

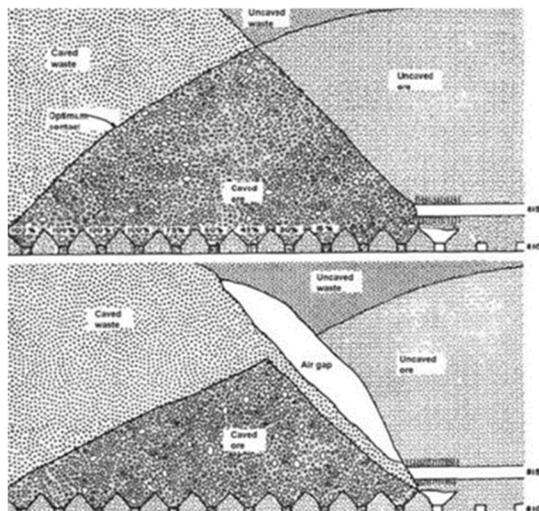


Figura 4: Fenómeno de Rilling. DeWolfe 1981

Julin (1992) propone que la extracción debe ser incrementada en igual porcentaje en cada línea de puntos de extracción (calle), el objetivo de esto es mantener un ángulo de contacto mineral-diluyente de 45°-50° para evitar el fenómeno de rilling planteado por DeWolfe.

Laubscher (1994, 2006) formula una serie de parámetros que controlan el comportamiento de la dilución, que se presentan resumidas en la Tabla 1.

*Tabla 1: Parámetros que controlan el comportamiento de la dilución según Laubscher (1994, 2006)*

<b>Condición</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Condición inicial de la dilución con respecto al mineral	1. Razón volumen de mineral y área de contacto entre mineral y diluyente.	Mientras mayor sea la razón entre el volumen de mineral y el área de contacto mineral-diluyente, menor será el contenido total de dilución extraído.
	2. Disposición y forma del material diluyente.	Mientras más irregular e inclinada sea la interfaz, mayor será el contenido de dilución en la mezcla extraída comparado con el caso de una interfaz lateral-vertical y de geometría regular.
	3. Alturas de columnas in-situ.	A mayor altura de columna in-situ, más tardía será la entrada de dilución.
Condición del flujo del mineral y dilución	4. Interacción de los elipsoides de extracción y dirección del flujo.	Mientras mayor sea la interacción entre los elipsoides de extracción, menor será el contenido de dilución que se extraiga de los puntos y más tardía será la entrada del material diluyente en ellos.
	5. Diferencias de fragmentación entre mineral y el material diluyente.	Entre más fina sea la fragmentación del material diluyente, relativa a la del mineral, mayor será el contenido de dilución en la mezcla y más temprana será la entrada del material diluyente al punto de extracción.
Estrategia de extracción	6. Variante de hundimiento utilizada (block o panel caving).	Una extracción desarrollada en block caving con pequeños bloques implica una dilución lateral mayor que en una estrategia de panel caving con un ángulo de extracción definido.
	7. Velocidad de extracción.	Se debe tener un buen cálculo de la velocidad de extracción adecuada para impedir la entrada de dilución o fenómenos como sismicidad o estallidos de aire, y permitir la propagación del caving. Se debe comenzar con poca velocidad e ir aumentando hasta que se conecte el caving y tratar de mantener una velocidad relativamente constante.
	8. Diferencias de tonelajes extraídos entre los puntos activos.	A mayor diferencia de tonelajes extraídos entre los puntos activos, más temprana será la entrada de dilución.

De acuerdo con los experimentos realizados por Bridgwater et al. (1978) y Hashim & Sharrock (2012), uno de los parámetros claves es la diferencia de fragmentación entre mineral y diluyentes, debido al fenómeno de percolación de finos, donde la diferencia de tamaño de las partículas ha demostrado ser un factor relevante, es decir, a mayor diferencia entre los tamaños existe mayor tasa de percolación. Sin embargo, estos experimentos no se realizaron en una configuración de block caving, sino que con celdas de corte.

Iribarra (2014) realizó experimentos, con razón de tamaño mineral/material fino de 31/1 y una escala 1:200. El estudio concluyó que la diferencia de tamaño entre partículas no es motivo suficiente para explicar una temprana entrada de dilución, el flujo de dilución hacia los puntos de extracción dependerá también de la estrategia de extracción implementada.

Otro factor clave, que plantea Laubscher (1994), es la diferencia de tonelajes extraídos en los puntos activos y contiguos. Otros autores han validado, esta hipótesis, mediante experimentación

con modelos físicos, como Susaeta (2004) que plantea incluso un índice de uniformidad de los tonelajes extraídos. Vergara (2016), mediante un experimento a escala de la mina Esmeralda de División El Teniente, Codelco, establece que la mayor velocidad de extracción de puntos en una secuencia de panel caving contribuye a la entrada de dilución temprana, no solo en esos puntos sino también en puntos vecinos a las zanjas sobre extraídas. El autor plantea que lo anterior guarda relación con el ángulo de flujo que se genera producto de la diferencia de alturas entre columnas, y al aumento de la porosidad en la zona cercana a los puntos de extracción, lo cual permitiría la percolación del material más fino.

## 2.2. Modelo de dilución de Laubscher

En base a algunos de los parámetros antes mencionados, Laubscher (1994) propone una relación (1) para estimar el punto de entrada de dilución (PED):

$$PED[\%] = \frac{H_c * S - HIZ}{H_c * S} * DCF * 100 \quad (1)$$

- **Punto entrada de dilución, PED (%):** Es el porcentaje de columna in-situ extraída en el cual se reporta ingreso de dilución.
- **Altura de columna del punto de extracción, H<sub>c</sub>:** Corresponde a la altura medida desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/material diluyente.
- **Esponjamiento alcanzado en la columna, S:** El cual corresponde al aumento relativo de volumen que experimenta la roca debido a su fragmentación. Es medido a través del factor de esponjamiento (S). Laubscher (1994), propone que los factores de esponjamiento típicos según tipo de fragmentación esperada de la roca son 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.
- **Altura de interacción, HIZ:** Corresponde a la altura desde la cual se producirá interacción entre los elipsoides de extracción. Laubscher afirma que ésta será función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el RMR del material diluyente y el mineral, y el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor.
- **Diferencia de extracción entre el punto y sus vecinos, DCF:** Se refiere a la diferencia entre los tonelajes extraídos de un punto de extracción con respecto a sus vecinos en un determinado período de tiempo. Laubscher (1994) propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje (DCF) cuyo cálculo se basa en la desviación estándar de los tonelajes extraídos entre un punto y sus vecinos a una escala de extracción mensual.

A partir del modelo propuesto por Laubscher, es importante destacar que, la ecuación es una aproximación determinista para un largo plazo basada en reglas empíricas, y no considera todos los parámetros que él mismo propone, ni otros relevantes. Así, el modelo asume que, bajo ciertas condiciones de calidad de roca, altura de columna, geometría del nivel de producción y control de tiraje, se tendrá el mismo punto de entrada de la dilución de forma independiente a la dirección de avance de la extracción y la potencial dilución lateral que pudiera afectarlo.

Ya definido el punto de entrada de dilución (PED), Laubscher (1994) plantea un modelo de mezcla volumétrico basado en la división de la columna de extracción en tajadas que poseen un volumen, densidad y leyes iniciales determinadas.

Cabe destacar que el modelo expuesto considera curvas de mezcla empíricas sin tomar en cuenta muchas consideraciones del flujo gravitacional. Se han realizado adaptaciones del modelo propuesto por Laubscher para dos y tres dimensiones, siendo este modelo volumétrico la base de los algoritmos de mezcla utilizados por la gran mayoría de las operaciones de hundimiento. Sus aplicaciones están enfocadas principalmente a la planificación y determinación de reservas.

### 2.3. Índice de uniformidad (Susaeta, 2004)

Susaeta (2004) plantea una medida para que la extracción sea más uniforme (exista tiraje interactivo) y la dilución observada en el punto de extracción sea menor. Para ello plantea un índice para definir si la extracción es uniforme o aislada. El índice de uniformidad se calcula como se muestra en la ecuación (2):

$$I.U. = \Delta + \Gamma * \frac{t_p - t_{min}}{t_{max}^2 * n} * \sum (t_{max} - t_i) \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta$ : Número de vecinos inactivos.
- $\Gamma$ : Factor de normalización igual a 99/89.
- $t_p$ : Tonelaje extraído del punto en un período de tiempo determinado.
- $t_i$ : Tonelaje extraído del punto  $i$  perteneciente a la vecindad del punto en cuestión en el período de tiempo determinado.
- $t_{max}$ : Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $t_{min}$ : Tonelaje mínimo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $n$ : Número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto en cuestión.

La primera dimensión ( $\Delta$ ) corresponde al número de vecinos inactivos del punto, mientras que la segunda se denomina “Índice de uniformidad específico”. Para determinar en qué condición de tiraje se encuentra un punto con un índice de uniformidad en un período de tiempo, Susaeta (2004) utiliza la matriz que se presenta en la Tabla 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2: Matriz de Uniformidad (Susaeta, 2004)

		Índice de Uniformidad Específico				
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Número de puntos inactivos en vecindad	0	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Semi	Semi
	1	Uniforme	Uniforme	Semi	Semi	Semi
	2	Uniforme	Semi	Semi	Semi	Aislado
	3	Semi	Semi	Semi	Aislado	Aislado
	4	Semi	Semi	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

A partir de esta definición, Susaeta (2004), introduce el “porcentaje de uniformidad” definiéndolo como el porcentaje de tiempo (o de toneladas extraídas) durante el cual un punto se encuentra extrayendo en condición uniforme.

Mediante un estudio, el autor, relacionó la uniformidad con el PED (base de datos de extracciones reales de las minas El Salvador, El Teniente y Andina) como se puede observar en la Figura 5. Susaeta (2004) evidencia la relación que existe entre el % de toneladas extraídas de manera

uniforme y semi-uniforme (en toda la vida útil del punto) con el PED. Así mismo, utiliza una vecindad de 7 punto (el punto a analizar y sus 6 vecinos más cercanos) y un período de tiempo de un 1 día para calcular el índice de uniformidad).

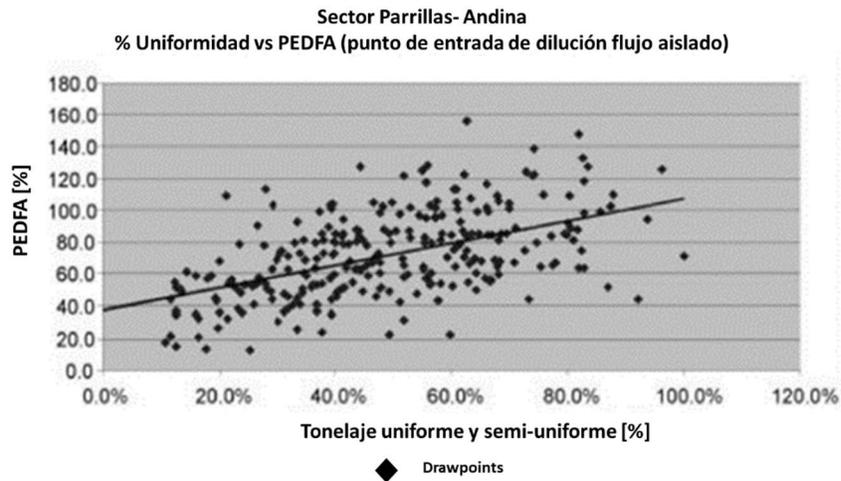


Figura 5: Gráfico I.U. (%tonelaje) y PED para el Sector Parrillas de Andina (Susaeta, 2004)

## 2.4. Mecanismos de entrada de dilución

Castro y Paredes (2014) proponen 3 mecanismos de entrada de dilución, luego de realizar un análisis de datos de las minas Andina y El Salvador:

- **Entrada de Dilución debido a desplazamiento vertical:**

Cuando la fuente de dilución se ubica encima del panel a explotar y existe una propagación regular del cave back hacia ella, la dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical.

- **Entrada de Dilución debido a desplazamiento lateral:**

Cuando el panel en cuestión se ubica al costado de un sector previamente explotado, a medida que su secuencia avanza, el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire suficientemente grande para permitir el ingreso de material quebrado y el ángulo de la pila de material granular permite el flujo lateral del material, éste viajará hasta los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado.

- **Entrada de Dilución posterior a un evento de colgadura del cave back:**

Si el radio hidráulico del área inicial abierta no es suficiente para propagar el caving, ocurrirá una colgadura del cave back. Si habiendo ocurrido esto, se continúa la extracción del área abierta sin incorporar más área, el vacío generado por la extracción no se llenará de material fragmentado y se acumulará un bolsón de aire. Una vez que se incorpore área nueva a la extracción, el cave back se propagará de manera repentina y la dilución ubicada encima del panel explotado ingresará a los puntos de extracción luego de un estallido de aire (De Nicola and Fishwick, 2000).

Los autores plantean que un factor determinante en los mecanismos propuestos anteriormente corresponde a la propagación del cave back debido a la ubicación de la dilución (condición de borde) y a la estrategia adoptada en esta área (condición operacional).

## 2.5. Aplicación de preacondicionamiento para evitar la dilución

El preacondicionamiento es una de las principales innovaciones en minería metálica de los últimos 20 años, en la cual el macizo rocoso mediante fracturamiento hidráulico o explosivos es acondicionado (Labbe 2014, Catalan 2015). La principal función del preacondicionamiento es el debilitamiento del macizo rocoso, esto puede generar una serie de consecuencias como: disminución de la granulometría, reducción de las colgaduras, disminución del riesgo sísmico, aumento de la velocidad de propagación del caving y reducción del tiempo conexión de hundimiento, muchas de estas consecuencias podrían generar cambios en el comportamiento de la dilución con fin de retrasar su ingreso y su porcentaje de entrada a los puntos de extracción (CODELCO, 2012).

La aplicación del preacondicionamiento mediante explosivos ha demostrado un resultado directo sobre la dilución, en Andina (Sougarret et al, 2004) aumentando el PED y bajando la cantidad de tonelaje de dilución, respecto a la zona sin preacondicionamiento.

## 2.6. Conclusiones revisión bibliográfica

Luego de realizar la revisión bibliográfica se pueden obtener dos grandes conclusiones:

1.- Es posible encontrar variables que podrían influir en el fenómeno de dilución, ya sea, en su entrada a los puntos de extracción como en el cierre de punto debido a su alta presencia. En la Tabla 3 se resume las posibles variables críticas para el entender el fenómeno de la dilución.

*Tabla 3: Posibles variables predictoras del fenómeno de dilución*

Variable	Tipo	Explicación Variable
Columna in-situ extraída [%]	Operacional	A mayor columna in-situ extraída mayor probabilidad de entrada de dilución, pues se está más cerca del quebrado o de la fuente de dilución (Laubscher, 2006).
Uniformidad de Extracción [%]	Operacional	A mayor uniformidad del tiraje menor probabilidad de entrada de dilución, pues se extrae de manera pareja los puntos sin sobre exigir a ciertos donde podría entrar la dilución en forma temprana. Esto lo comprueba el estudio hecho por Susaeta (2004).
Alturas de columnas in-situ [m]	Entorno	A mayor altura de columna in-situ menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues existe una mayor separación entre la extracción inicial y la fuente de dilución (Laubscher, 2006).
Fragmentación (mineral/diluyente)	Entorno	A menor relación entre fragmentación mineral/diluyente, o cuando más cercana a l sea, menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues es menor la migración de finos y por ende de dilución (Laubscher, 2006; Hashim & Sharrock, 2012).
Velocidad de extracción [ton/(m <sup>2</sup> *día)]	Operacional	A mayor velocidad de extracción mayor probabilidad de entrada de dilución, en especial si hay cambios de velocidad de un período a otro (Laubscher, 2006), o notables diferencias de velocidad entre puntos de extracción (Vergara, 2016).

Medida de preacondicionamiento	Entorno	A mayor intensidad del preacondicionamiento, menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues se evitaría grandes diferencias de fragmentación entre el mineral y el diluyente, evitando la migración de finos, también disminuirá el tiempo de conexión del hundimiento y la probabilidad de air gap (Sougarret et al, 2004).
Cantidad de dilución de sobrecarga	Entorno	A mayor cantidad de dilución respecto a la del mineral, más temprana será la entrada y mayor cantidad de dilución se extraerá en los puntos de extracción (Laubscher 1994).
Propagación del caving	Operacional/ Entorno	La velocidad y forma de la propagación del caving resulta fundamental para la entrada de dilución, pues determina las zonas mas propensas a fluir y las zonas que quedan sin movimiento.

2.- Aun cuando existen herramientas para la estimación de la dilución en el largo plazo como: ecuaciones deterministas basadas en reglas empíricas (Laubscher, 1994), ecuaciones basadas en experimentos (Susaeta, 2004) y softwares como PCBC (Diering, 2000), REBOP (Cundall et al, 2000) o autómatas celulares (Castro & Whiten, 2007), que mediante diversos mecanismos predicen la dilución en un plan minero, en general no han sido capaces de establecer planes altamente confiables en relación con la dilución en el corto plazo.

Por ende, es necesario establecer con mayor claridad las variables claves del comportamiento de la dilución, además de tener una herramienta que permita cuantificar su importancia en la ocurrencia del fenómeno.

# CAPÍTULO 3

## Cuantificación de migración de finos en block/panel caving

Este capítulo de la investigación será enviado a la revista International Journal of Rock Mechanics of Mining Sciences. El presente capítulo muestra los principales resultados del modelamiento experimental de la migración de finos en un modelo físico.

### Resumen

El método de block/panel caving tiene dentro de sus principales desafíos en la extracción, la entrada de dilución. Por lo que una de las principales tareas del diseño y de la planificación minera es evitar o retrasar la entrada de dilución a los puntos de extracción, siendo clave estudiar cuáles son las principales variables que impactan en su comportamiento. En muchas ocasiones la dilución se presenta como material de menor tamaño comparado con el mineral, es por ello por lo que en este trabajo se estudia la entrada de dilución como migración de finos, mediante la realización de experimentos físicos a escala (1:50) donde se relacionan una serie de variables que influyen en el comportamiento de la dilución/fino, como: la relación granulométrica entre material grueso y fino, el tipo de tiraje, y la cantidad de fino de sobrecarga.

Todas las variables analizadas tienen relación con el comportamiento de la dilución, en especial la granulometría. En primer lugar, se utiliza una relación de 11:1 entre los  $d_{80}$  del mineral grueso/fino, con la cual se logra observar la migración de material fino. Al utilizar una granulometría del mineral grueso más distribuida, disminuyendo el  $d_{50}$  y  $d_{10}$  (manteniendo el  $d_{100}$  y  $d_{80}$ ), se logra retrasar de forma importante la entrada de dilución (la masa extraída antes de la entrada de fino cambio de 24 [kg] a 40 [kg] y 57 [kg]) y además la cantidad de dilución en el tiempo disminuye (de un máximo de un 90% paso a un 70% máximo). Adicional a la granulometría, el tiraje presentó un impacto relevante en términos de dilución, cuando se realiza un tiraje aislado la dilución ingresa de forma muy temprana (58%) y finalmente la cantidad de fino de sobrecarga también tiene relación con la cantidad de dilución extraída, una mayor cantidad de dilución de sobrecarga implica una entrada más temprana de dilución y una mayor cantidad de dilución extraída total. Los experimentos permiten entender las variables que influyen en la entrada de dilución en minería de caving a través de la migración de finos.

# 1 Introducción

Block/panel caving son métodos subterráneos de extracción masiva de mineral fundamentados en la acción de la gravedad, donde el cuerpo mineral es socavado basalmente para iniciar el hundimiento natural de la columna mineral. La propagación del hundimiento continuará en la medida que la roca fragmentada sea extraída permitiendo su esponjamiento, hasta alcanzar la superficie o un nivel previamente explotado (Brown, 2004). Normalmente en este método de explotación, sobre o a un costado de la columna de mineral extraíble, se encuentra una zona de mineral sin valor económico, este material es llamado dilución. La dilución es prácticamente inherente a la minería caving por ello uno de los grandes objetivos en el diseño y operación es poder evitar o retrasar su entrada a los puntos de extracción, esto debido al impacto económico y de seguridad negativo (estallidos de finos o de barro) que genera.

De acuerdo con Laubscher (2006) existen una serie de variables que influyen en el comportamiento de la dilución, como, por ejemplo: la razón de volumen mineral respecto al diluyente, la disposición y forma mineral-diluyente, la diferencia de fragmentación mineral-diluyente, la interacción elipsoides de extracción, la velocidad de extracción, las alturas in-situ, las diferencias de tonelajes extraídos entre puntos activos. Una de las variables más importante es la diferencia de fragmentación entre mineral y diluyente, pues se produce el fenómeno de migración de finos.

Muchos investigadores han estudiado la migración de finos (Bridgwater, 1978; Castro, 2006; Pierce, 2009; Hashim & Sharrock 2009; Hashim, 2011; Iribarra, 2014; Vergara, 2016).

Bridgwater (1978) fue de los primeros autores en evaluar este fenómeno mediante experimentación física, usando celdas de corte con partículas esféricas, relacionando la razón entre el tamaño de las partículas con la percolación, como se muestra en (3).

$$\frac{\bar{L}}{y*d_b} = k_1 \exp(-k_2 \frac{d_p}{d_b}) \quad (3)$$

Donde  $\bar{L}$  es la distancia de percolación media de una partícula fina; y es el esfuerzo de corte debido al movimiento de la celda;  $d_p$  es el diámetro de la partícula fina;  $d_b$  es el diámetro de la partícula gruesa,  $k_1$  y  $k_2$  son constantes.

Por otro lado, Pierce (2009) realizó experimentos de migración de finos a través de simulaciones en PFC3D. Como conclusiones se tiene que los finos tienen menor movimiento lateral que los gruesos, y que la migración ocurre principalmente de forma vertical. Las partículas finas tienden a migrar más cerca de los límites de la zona de movimiento (IMZ) donde las velocidades son más bajas, esto repercute en acumulación de finos en esas zonas, lo que Pierce (2009) relaciona con la acumulación de finos en algunas operaciones mineras, lo cual podría producir un flujo violento de granulometría fina (Pretorious and Ngidi, 2008).

Hashim & Sharrock (2009) y Hashim (2011) realizaron experimentos similares a los de Bridgwater (1978), pero variando la forma de las partículas, donde resulta que una forma de partícula más angular genera una mayor percolación, ajustando así la ecuación de percolación.

Iribarra (2014), realizó experimentos en un modelo físico escala 1:200, donde intentó emular una mina explotada mediante el método de Block /Panel Caving, con varios puntos de extracción. El modelo representaba una columna de extracción de 500 m, la cual fue llenada con material mina con tamaño grueso y fino, cada uno de ellos representado por sus curvas de distribución granulométrica, obtenidas de datos mina. La diferencia en los  $d_{50}$  entre fino/grueso es de 0.031. Para el caso del experimento de extracción uniforme no hubo migración de finos, esto se puede deber que, al considerar distribuciones de tamaño de partículas amplias, la migración de finos sea más difícil dado que hay menos espacios vacíos, lo que dificulta la migración de ellos.

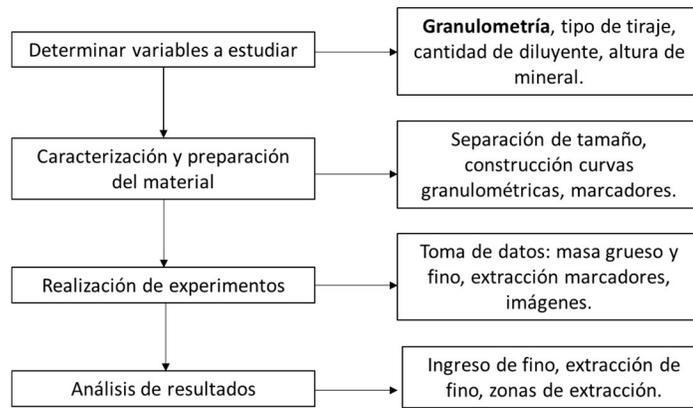
Vergara (2016) realizó experimentos de flujo gravitacional, en una escala 1:200, replicando condiciones de una mina de Block /Panel Caving con tres tipos de material presente, mineral (desde el nivel de producción hasta los 150 m, con un  $d_{80} = 0.66$  m), quebrado (desde los 150 m hasta los 400 m, con  $d_{80} = 0.46$  m) y estéril (desde los 400m hasta los 470 m, con  $d_{80} = 0.13$ m). Realizo tres tipos de experimentos con diferentes objetivos, siendo el primero de ellos de importancia para la presente investigación. Este experimento, con 24 puntos de extracción tenía como objetivo cuantificar la migración de finos desde un botadero de estéril, determinar el punto de entrada de quebrado y observar el efecto de la no extracción de una zanja sobre el flujo (4 puntos de extracción). Como conclusión del experimento se tiene que finalmente, bajo las condiciones evaluadas no se observó interacción entre el material fino (estéril) y el nivel de producción.

La mayoría de los experimentos de migración de finos a la fecha se han realizado con partículas esféricas mono-tamaños de vidrio o arena (Bridgwater, 1978; Hashim & Sharrock, 2009; Hashim 2011). Además, los experimentos realizados en condiciones similares a las de minería de Caving no han logrado demostrar de forma clara la existencia del fenómeno de migración de finos (Castro 2006; Iribarra 2014; Vergara 2016), es por ello, que en este trabajo se realizan experimentos de migración de finos, a una escala 1:50, buscando las condiciones de extracción y distribuciones granulométricas que permiten la percolación y estudiando cómo influyen estas variables en la percolación.

## **2 Metodología experimental**

La metodología del estudio consiste en realizar una serie de experimentos que permiten estudiar variables que podrían influir en la migración de finos mediante un modelo físico a escala. La metodología se muestra en la Figura 6.

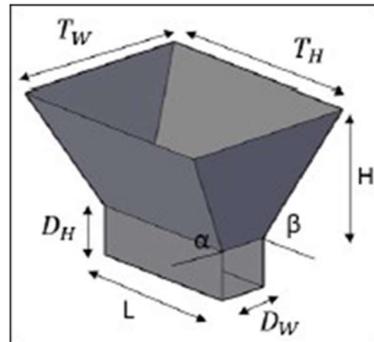
En primer lugar, se determinaron las variables a estudiar, las cuales fueron: la granulometría, tipo de tiraje, cantidad de diluyente y la altura de mineral. Antes de realizar los experimentos, se debe caracterizar y preparar el material. Se realizan los experimentos en un set-up experimental (ver 2.1), donde son tomados una serie de datos como: masas extraídas, marcadores e imágenes. Finalmente se analizan los resultados y se concluye respecto a ello.



**Figura 6: Metodología modelamiento experimental de la dilución**

## 2.1 Set-up experimental

El set up experimental es un modelo físico de acrílico con una batea en la base con 2 puntos de extracción, todo a una escala 1:50. las dimensiones del modelo físico y batea se muestran en la Figura 7 y Tabla 4. Ambos puntos de extracción cuentan con una pala de LHD a escala para realizar la extracción de material de manera mecanizada simulando la extracción en operaciones de block/panel caving.



**Figura 7: Representación parámetros batea**

**Tabla 4: Parámetros batea modelo físico**

Escala laboratorio							
L [cm]	H [cm]	Tw [cm]	Th [cm]	Dw [cm]	Dh [cm]	Alpha [°]	Beta [°]
28	21	24	28	9.6	9.6	71.1	90

Se coloca material de menor granulometría en la parte superior del modelo, como se aprecia en la Figura 8 y Tabla 5. La relación de tamaño inicial ( $d_{80}$ ) entre el mineral grueso/fino es de 11:1, pues es una diferencia de tamaño que se puede presentar en una mina de block/panel caving.

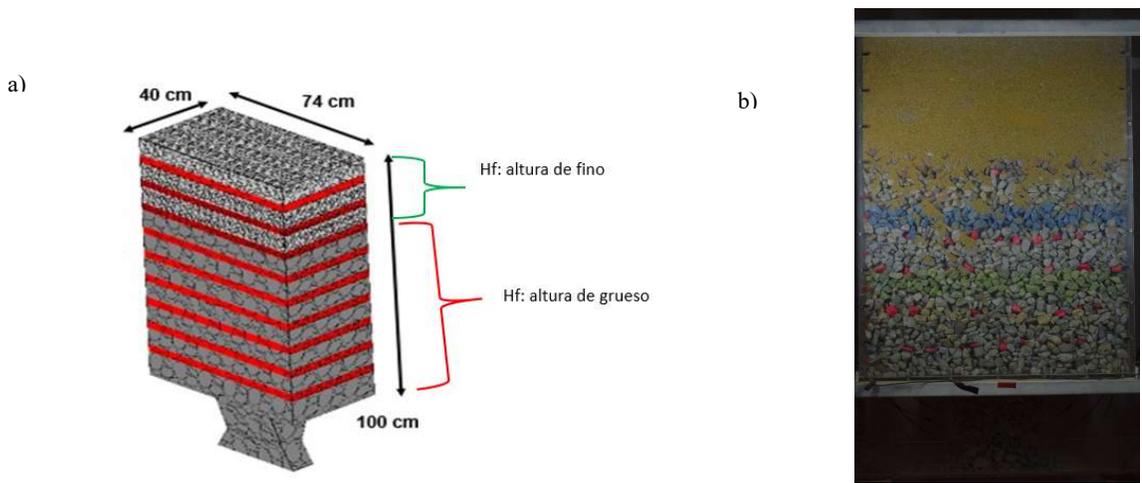


Figura 8: a) Representación modelo físico b) Modelo físico

Tabla 5: Parámetros modelo físico

Modelo físico		
Parámetro	Escala laboratorio [cm]	Escala mina [m]
Largo	74	37
Ancho	40	20
Alto	100	50

Para medir las zonas de extracción, en los experimentos se colocaron marcadores, en la batea se instalan cada 5 [cm]; y cada 10 [cm] sobre el nivel de hundimiento, en total se instalan 788 marcadores. La extracción de marcadores permite estimar el comportamiento de la zona de extracción de los experimentos. En la Figura 9 se muestra la distribución de marcadores en perfil y planta.

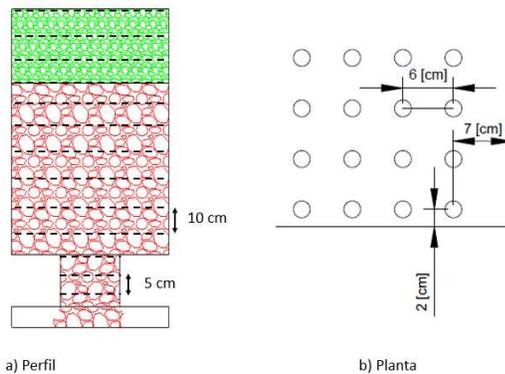


Figura 9: a) Vista de perfil de los marcadores; b) Vista en planta de los marcadores

## 2.2 Caracterización del mineral

El mineral utilizado corresponde a roca QIS (Quarzo igual a Sericita) de Mina Chuquicamata Subterránea (MCHS).

Se caracterizó el mineral ocupado de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Esfericidad (S): Hace referencia a la forma global de la partícula y refleja la semejanza entre el largo, alto y ancho (Cho et al, 2006). Esta se puede cuantificar como el radio del

círculo inscrito más grande ( $r_{max-in}$ ) con respecto al radio del círculo circunscrito más pequeño ( $r_{min-in}$ ), como muestra en la ecuación (3).

$$S = \frac{r_{max-in}}{r_{min-in}} \quad (3)$$

- Redondez (R): Es cuantificada (4) como el radio de curvatura medio de las características superficiales y el radio del círculo inscrito más grande ( $r_{max-in}$ ) en la partícula. Junto a la esfericidad definen el factor de forma de una partícula, como se muestra en la Figura 10.

$$R = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-i}} \quad (4)$$

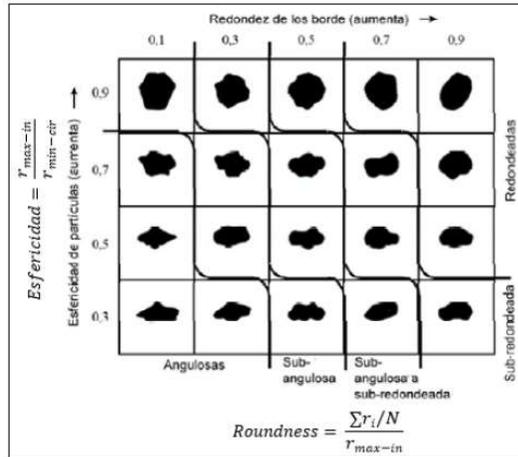


Figura 10: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007)

- Carga puntual ( $I_s$ ): La prueba de carga puntual es una forma rápida y económica para estimar de manera indirecta la resistencia a la compresión uniaxial (ISRM Comisión, 1985). Esta prueba consiste en romper las muestras de diámetro  $D_e$ , aplicando una carga concentrada “P” (5).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (5)$$

Las características del mineral usado se muestran en la Tabla 6. La clasificación de la roca es sub-angulosa a sub-redondeada.

Tabla 6: Resumen caracterización material

Parámetro	Valor
Esfericidad	0.68
Redondez	0.20
Carga puntual [MPa]	1.66
Densidad aparente mineral grueso [ $kg/m^3$ ]	1,900
Densidad aparente mineral fino [ $kg/m^3$ ]	1,600
Densidad in-situ [ $kg/m^3$ ]	2,540
Ángulo de fricción interna	37°

## 2.3 Plan experimental

Para poder estudiar las variables que podrían influir en la entrada de dilución/fino se realizan ocho experimentos que se detallan en la Tabla 7. En todos los experimentos se utiliza la misma granulometría para la dilución/material fino.

Tabla 7: Experimentos realizados

Experimentos	Variabes	Objetivos
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relleno de columna de finos para mantener la carga constante (columna de finos “infinita”);</li> <li>- Tiraje aislado;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 35cm (155 kg).</li> </ul>	Establecer si ocurre la migración de finos a esta relación de tamaños y estudiar la relación del tiraje en la entrada de fino.
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relleno de columna con finos para mantener la carga constante (columna de finos “infinita”);</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 35cm (155kg).</li> </ul>	Estudiar la relación del tiraje en la entrada de finos.
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin relleno de la columna con finos (columna de finos finita);</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 35cm (155 kg).</li> </ul>	Estudiar la relación de la cantidad de fino sobre la columna de mineral en la entrada de fino.
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin relleno de la columna con finos (columna de finos finita);</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 20cm (89 kg)</li> </ul>	Estudiar la relación de cambio de altura de finos en la entrada de este.
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin relleno de la columna con finos (columna de finos finita);</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 50cm (254 kg); altura de fino 50cm (221 kg).</li> </ul>	Estudiar la relación de cambio de altura de gruesos en la entrada de fino.
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Replica experimento 5</li> </ul>	Estudiar la variabilidad experimental.
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Curva granulometría del mineral grueso más amplia;</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 35cm (155 kg), sin relleno de la columna con finos.</li> </ul>	Estudiar el efecto del cambio granulométrico en la entrada de fino (cambio $d_{50}$ )
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Curva granulometría del mineral grueso más amplia;</li> <li>- Tiraje uniforme;</li> <li>- Altura de grueso 65cm (330 kg); altura de fino 35cm (155 kg), sin relleno de la columna con finos.</li> </ul>	Estudiar el efecto del cambio granulométrico en la entrada de fino (cambio $d_{10}$ )

La granulometría del mineral grueso es igual para los primeros seis experimentos, donde se utiliza una curva estrecha, y en los experimentos siete y ocho se cambia la granulometría del mineral grueso. Los cambios que se realizan, en el mineral grueso, es ampliar la curva granulométrica añadiendo mineral fino, manteniendo el  $d_{100}$  y  $d_{80}$ , pero modificando los  $d_{50}$  y  $d_{10}$ . La Figura 11

muestra las granulometrías utilizadas y en la Tabla 8 se presentan los detalles de las curvas granulométricas y el coeficiente de uniformidad (Cu) que se calcula como  $d_{60}/d_{10}$  (Craig, 2004).

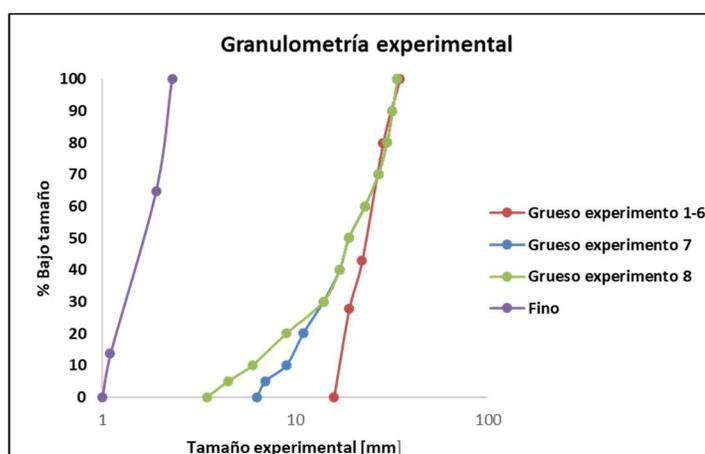


Figura 11: Granulometrías experimental

Se aprecia en la Tabla 8 los experimentos iniciales el coeficiente de uniformidad del mineral grueso es baja respecto a los experimentos 7 y 8.

Tabla 8: Caracterización curvas granulométricas experimentales

Curva	$d_{10}$ escala laboratorio (escala mina)	$d_{50}$ escala laboratorio (escala mina)	$d_{60}$ escala laboratorio (escala mina)	$d_{80}$ escala laboratorio (escala mina)	Coefficiente de uniformidad, Cu
Experimentos 1-6 [grueso]	17.0mm (0.85m)	23.1mm (1.16m)	25.1mm (1.26m)	30.0mm (1.50m)	1.5
Experimento 7 [grueso]	9.0mm (0.45m)	19.0mm (0.95m)	23.0mm (1.15m)	30.0mm (1.50m)	2.6
Experimento 8 [grueso]	6.0mm (0.30m)	19.0mm (0.95m)	23.0mm (1.15m)	30.0mm (1.50m)	3.8
Experimentos 1-8 [fino]	1.1mm (0.06m)	1.8mm (0.09m)	1.9mm (0.10m)	2.1mm (0.11m)	1.7

A continuación, se presentan los resultados de los experimentos realizados. Dado que las curvas granulométricas entre el mineral fino y grueso no se sobreponen, es decir el  $d_{100} \text{ fino} < d_{1} \text{ grueso}$ , es posible separar en cada extracción en mineral fino del grueso mediante un harnero. En la Figura 12 se aprecia las configuraciones iniciales de cada experimento.

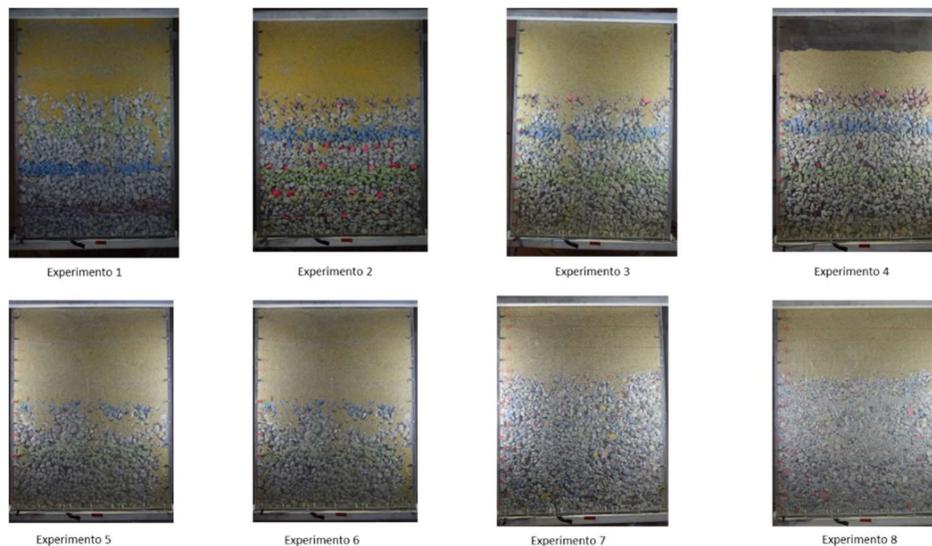


Figura 12: Imágenes iniciales experimentos realizados

### 3 Resultados experimentales de dilución

#### 3.1 Migración de fino desde punto de extracción vecino

En el experimento 1, se extrae de manera aislada, por solo un punto de extracción (LHD 1), al tener un ingreso muy alto de fino (sobre el 90% en el periodo de extracción) el punto se cierra y se comienza a extraer por el punto de extracción vecino de la misma batea (LHD 2). El ingreso de dilución en LHD 2 es de forma muy temprana (menos de un kilogramo de masa extraída, 0.6% de la columna extraída), como se aprecia en la Figura 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lo cual explica que cuando un punto de extracción presenta fino, los puntos de extracción vecinos tendrían alto riesgo de ingreso de fino (Arancibia et al, 2018).

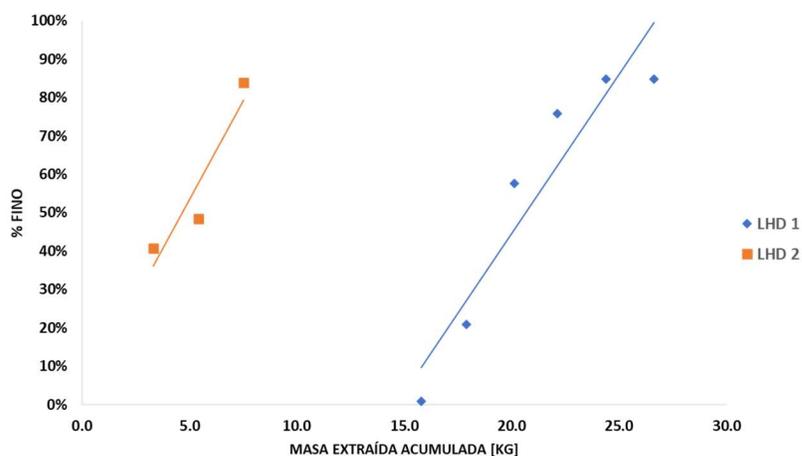


Figura 13: Resultado experimento 1

En la Figura 14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra como la dilución (mineral fino) ingresa en LHD 1 (a), y en b) como la dilución ingresa a LHD 2 rápidamente debido a la cercanía que existe con el material diluyente.



a) Dilución en LHD1

b) Dilución en LHD2

Figura 14: a) Dilución en LHD 1; b) Dilución en LHD 2

### 3.2 Relación tipo de tiraje en la migración de finos

La diferencia de tiraje implicó un retraso en la entrada de dilución (ver la Figura 15), en el experimento 1 (tiraje aislado) la dilución ingreso a los 15.8 [kg] extraídos (4.7% de la columna extraída) y en el experimento 2 ingreso (tiraje uniforme) a los 25.1 [kg] extraídos (7.5% de la columna extraída), esto es un 58% más de masa extraída antes de la entrada de fino. La dilución, una vez que entra, evoluciona en el tiempo de forma similar en ambos experimentos, como se aprecia en la Figura 15.

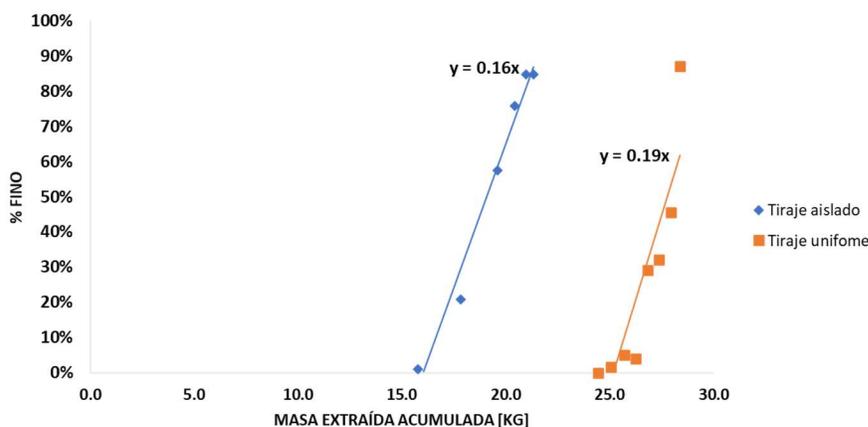


Figura 15: Migración de finos según tipo de tiraje

### 3.3 Relación cantidad de dilución de sobrecarga en la migración de finos

Se estudia la relación entre la sobrecarga y la migración de finos (ver Figura 16). En todos los experimentos sin relleno de fino (3, 4 y 5) se pudo apreciar que ocurre una disminución de la cantidad de fino que entra a los puntos de extracción luego de una gran cantidad de dilución extraída, esto se debe a que se ha extraído gran parte del diluyente.

Al comparar el experimento 2 y 3 se aprecia un retraso en la entrada de dilución de un 3% (de 22.8kg a los 23.5kg), además de una entrada de manera más lenta en el experimento 3. De la misma manera se produjo una entrada de dilución más tardía (26.5kg; +12%) y lenta en el tiempo en el

experimento 4; y una entrada más temprana (15.0kg; -36%) y agresiva en el tiempo en el experimento 5, comparados con el experimento 3.

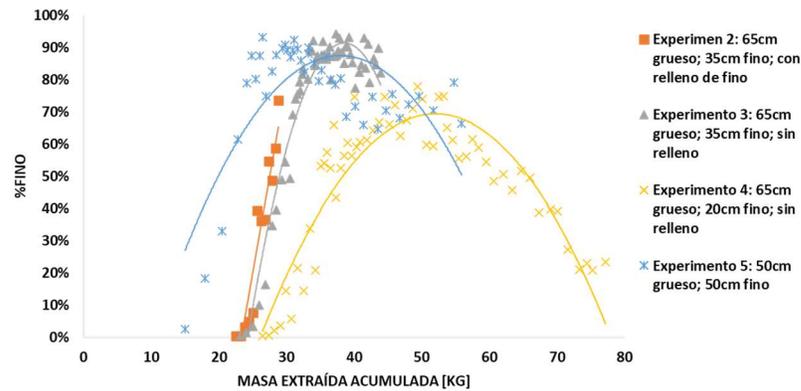


Figura 16: Migración de fino según la cantidad de dilución de sobrecarga

### 3.4 Variación experimental

Para determinar la variabilidad que tienen los experimentos de migración de finos, se realiza una réplica de un experimento, en este caso del experimento 5. La variabilidad experimental es muy baja, el ingreso de fino en el experimento 5 es a los 14.5 [kg] y en el experimento 6 (réplica) es a los 15 [kg], es decir un 3% de variación, además la forma en que ingresa el fino en el tiempo es similar en ambos experimentos solo que desplazado debido al cambio en el ingreso de la dilución, como se aprecia en la Figura 17.

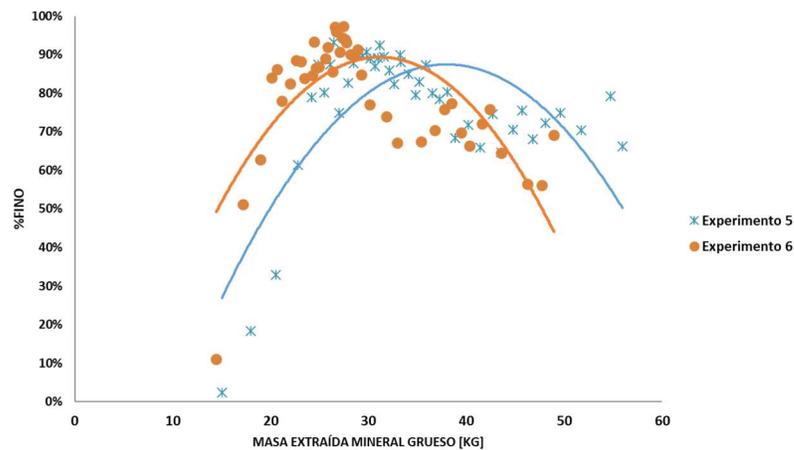


Figura 17: Réplica experimental

### 3.5 Cambios de la fragmentación del mineral grueso en la migración de finos

El cambio granulométrico afecta la entrada de fino y la cantidad de fino extraído. Al ampliar la granulometría del grueso, se mantiene el  $d_{100}$  y  $d_{80}$  y se modifican el  $d_{50}$  y  $d_{10}$ , es decir al introducir mineral de menor tamaño a la curva gruesa hace que existe menor migración de fino (experimentos 7 y 8). Esto implica que los tamaños menores de una curva granulométrica ( $d_{50}$ - $d_{10}$ ) tienen una alta influencia en migración de fino.

Ampliar el Cu de 1.5 (Experimento 3) a 2.6 (Experimento 7) implicó un retraso de la entrada de dilución desde 23.5kg a 39.8kg (+69%), además de tener una extracción de fino mucho más lenta, como se muestra en la Figura 18.

Ampliar el Cu de 1.5 (Experimento 3) a 3.8 (Experimento 8) implicó un retraso de la entrada de dilución desde 23.5kg a 57.1kg (+143%), además de tener una extracción de fino mucho más lenta, como se muestra en la Figura 18.

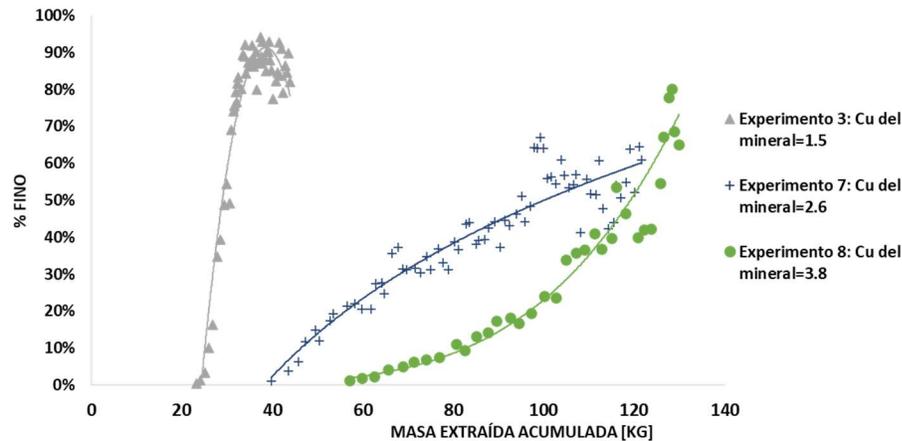


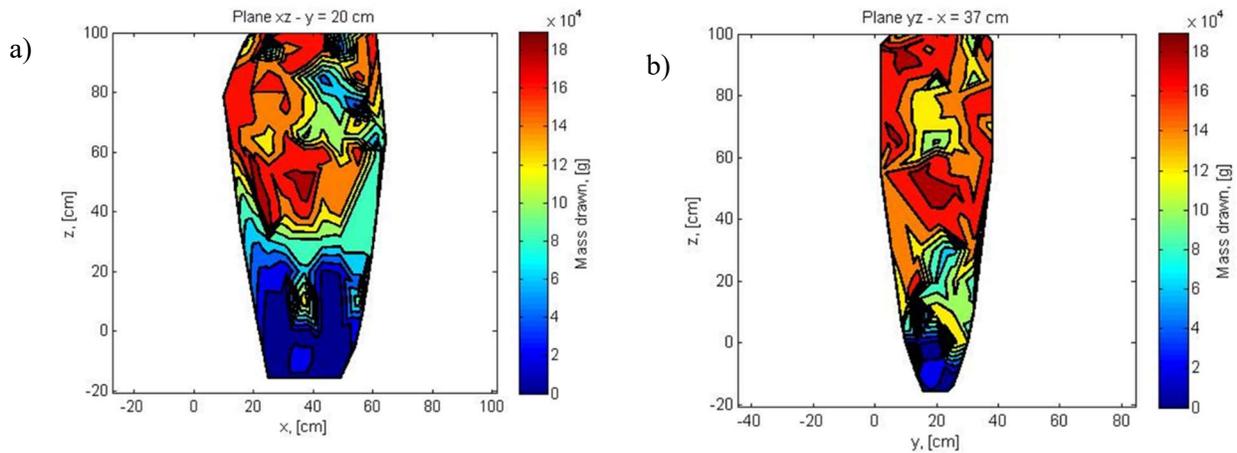
Figura 18: Migración de fino según cambio granulométrico del mineral

## 4 Análisis de extracción

Se realiza un análisis de las zonas de extracción para los experimentos 5, 7 y 8 que representan diferentes granulometrías en el mineral grueso, para estudiar cómo se comporta el flujo con migración de finos.

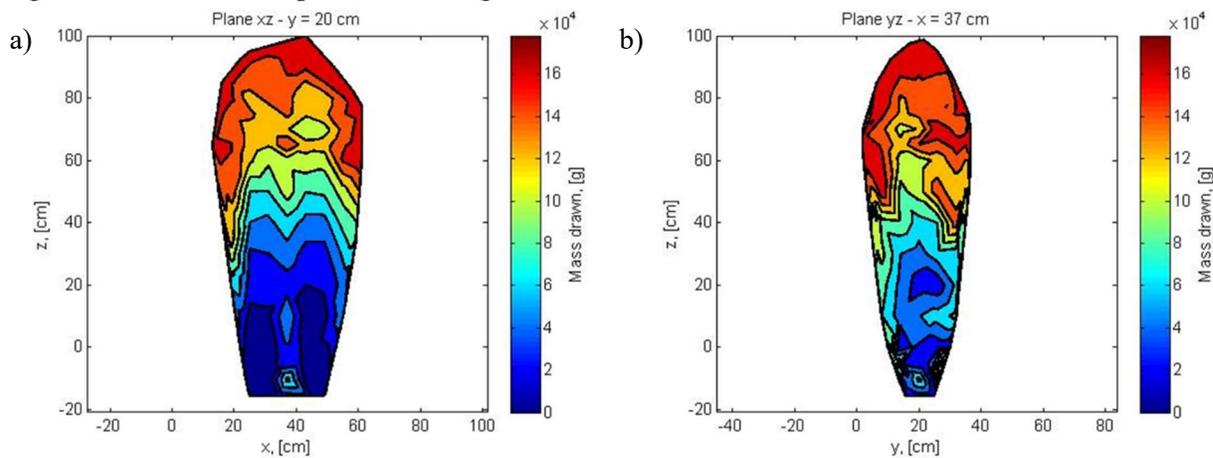
Las zonas de extracción de los experimentos analizados muestran la migración de fino, en especial en el experimento 5, donde la migración es mucho mayor. La mayor cantidad de migración de fino se proviene del sector central de la zona de extracción.

En la Figura 19 se muestra la zona de extracción del experimento 5, en a) se observa un corte en el plano xz con  $y=20$  cm y en b) se observa un corte en el plano yz con  $x=37$  cm, estos corresponden a la mitad del modelo físico en cada eje. Se observa un flujo más caótico en la zona del mineral fino (sobre los 50 [cm]), en esa zona se puede apreciar como hubo marcadores finos que se extrajeron muy temprano (al mismo tiempo que el mineral grueso ubicado entre los 20-40 [cm]). La mayor parte de la migración de fino se produjo por la zona central de la zona de extracción. La zona de extracción en el mineral fino tiene un ancho similar que el mineral grueso.



**Figura 19: Zona de extracción Experimento 5; a) Perfil xz, y=20 cm b) Plano yz, x=37 cm**

En la Figura 20 se muestra la zona de extracción del experimento 7, en este caso el interfaz grueso/fino se ubica a los 65 [cm]. La zona de extracción en el mineral fino es mucho más ordenada que en el experimento 5, pero se encuentran zonas en el mineral fino que muestran que es extraído de forma más rápida, en especial entre los 65-80 [cm]. La zona de extracción en el mineral fino sigue la misma forma que el mineral grueso.



**Figura 20: Zona de extracción Experimento 7; a) Perfil xz, y=20 cm b) Plano yz, x=37 cm**

En la Figura 21 se muestra la zona de extracción del experimento 8, en este caso el interfaz grueso/fino se ubica a los 65 [cm]. La zona de extracción en el mineral fino es mucho más ordenada que en el experimento 5 y 7, pero se encuentran zonas en el mineral fino que muestran que es extraído de forma más rápida (existe migración), en especial entre los 65-80 [cm]. La zona de

extracción del mineral fino es más estrecha que la del mineral grueso, es especial sobre los 80 [cm], como se ve en la Figura 21.

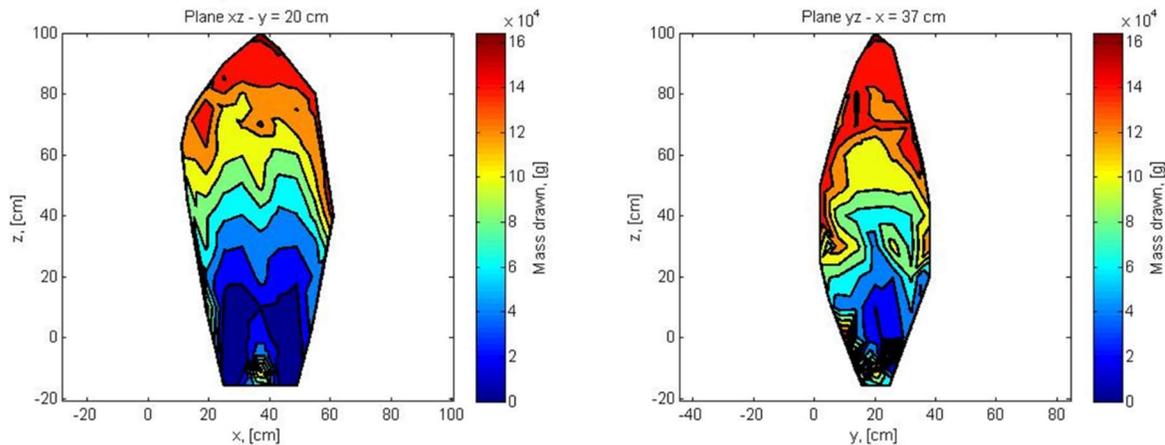


Figura 21: Zona de extracción Experimento 8; a) Perfil xz, y=20 cm b) Plano yz, x=37 cm

En general al estudiar las zonas de extracción no se aprecia mayores diferencias entre la zona que genera el mineral grueso y fino, esto implica que la zona de extracción está definida por la granulometría gruesa, pues se hubiese esperado que la granulometría fina generará un angostamiento evidente en la zona de extracción debido a que un mineral fino tiene un menor ancho en la zona de extracción (Laubscher 1994, Sanchez et al, 2019).

## 5 Conclusiones

Los experimentos muestran que existe migración de finos para la relación de tamaños entre grueso/fino y las granulometrías usadas.

Las variables estudiadas (tiraje, relación cantidad de mineral grueso/fino, alturas de mineral grueso/fino, granulometrías del mineral grueso) tienen incidencia en la entrada de fino a los puntos de extracción.

La variable más relevante, en esta investigación, en la migración de fino es la granulometría del mineral grueso, pues permite retrasar hasta en un 143% la entrada de fino. En esta investigación lo que se varía es la granulometría del mineral grueso, pero no la granulometría completa, sino que solo la parte de menor tamaño de la granulometría ( $d_{60}$  para abajo). Los resultados reflejan que granulometrías más amplias tienen una menor migración de finos, esto se debe a que el mineral grueso, con granulometría más amplia, deja menos espacios vacíos para que se produzca la percolación. Esto tiene implicancias en la minería de caving, pues se debe procurar tener granulometrías más finas en el mineral, en especial para los tamaños menores ( $d_{50}$ - $d_{10}$ ) y así evitar la entrada temprana de mineral fino, en especial si es dilución.

En relación con el tipo de tiraje, existe un 58% más de masa extraída antes del ingreso de fino cuando se extrae de forma uniforme en comparación a la extracción aislada. Además, cuando un punto se extrae de forma aislada y luego de cerrado ese punto se comienza a extraer al punto vecino, la dilución o fino ingresa de forma muy temprana a ese punto de extracción, es decir, existe dilución lateral a nivel de puntos de extracción, como se demuestra en el experimento 1.

Las variaciones de cantidad de mineral grueso/fino tiene implicancias en la extracción de fino, especialmente luego de su entrada, pues al tener una menor cantidad de mineral fino en relación con el grueso, implica que se extrae menor cantidad de fino, llegando a menores porcentajes extraídos en el tiempo.

En general, al estudiar las zonas de extracción no se aprecia mayores diferencias entre la zona que genera el mineral grueso y fino, esto implica que la zona de extracción está definida por la granulometría gruesa, pues se hubiese esperado que la granulometría fina generará un angostamiento evidente en la zona de extracción en altura.

## 6 Bibliografía

Arancibia L, Castro R, Valencia M, Cifuentes M. 2018. Modelamiento de la entrada temprana de la dilución a través de técnicas de regresión. En U-Mining 2018, Universidad de Chile, pp. 56-64.

Bridgwater, J, Cooke, MH and Scott, AM 1978. Inter-particle percolation: equipment development and mean percolation velocities. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, vol. 56, pp. 157-167.

Brown, E. 2004. Block Caving Geomechanics. 2nd ed. Brisbane: Julius Kruttschnitt Minerals Research Center, University of Queensland.

Castro, RL 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD thesis, The University of Queensland, Brisbane.

Cho, G, Dodds J and Santamarina, J. 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering. Vol. 132, pp. 591-602.

Craig, R F. 2004. Craig's soil mechanics. Seventh Edition, pp. 71 -74.

Hashim, M. 2011. Particle Percolation in block caving mines. PhD thesis. Australia, University of New South Wales

Hashim, H., Sharrock, G. 2012. Dimensionless percolation rate of particles in block caving mines. En MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Ontario.

Hoz, K. 2007. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares grueso. Tesis para optar al grado de magister en minería. Universidad de Chile, Chile.

Iribarra, S. 2014. Estudio experimental de migración de finos en minería de Caving. Memoria para optar al título ingeniero civil de minas, Santiago de Chile: Universidad de Chile.

ISRM, B. 1985. Commission on testing methods, working group on revision of the point load test methodology, suggested method for determining point load strength. International J. RockMech. Min. Sei. & Geomech, vol. 22, no 2, p. 51-60.

Laubscher, D. H. 1994. Cave mining-the state of the art. Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 94(10), pp. 279-293.

Laubscher, D. 2006. Cave Mining Handbook. South Africa: De Beers Group.

Pierce, ME. 2009. A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. PhD thesis, The University of Queensland, Brisbane.

Pretorius, D., & Ngidi, S. 2008. Cave management ensuring optimal life of mine at Palabora. En MassMin 2008, pp. 63-71, Lulea, Sweden.

Sánchez, V., Castro, R. L., & Palma, S. 2019. Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 114, p. 24-32.

Vergara, P. 2016. Estudio experimental de flujo gravitacional de minería de Caving. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

# CAPÍTULO 4

## Modelamiento de la entrada temprana de la dilución a través de técnicas de regresión

Este capítulo de la investigación fue publicado en el Proceedings del II Congreso Iberoamericano en Minería Subterránea y a Cielo Abierto, U-Mining 2018. El presente capítulo muestra los principales resultados del análisis y modelos estadísticos realizado a una base de datos de dilución de El Salvador y Andina.

### Resumen

El método de explotación de block/panel caving tiene dentro de sus dificultades principales evitar o retrasar la entrada temprana de dilución, pues genera un perjuicio económico a los proyectos mineros. Por lo que se han generado una serie de herramientas que permiten simular el comportamiento de la dilución, pero con resultados deficientes y con enfoque en el largo plazo.

Por eso que el presente artículo, tiene como objetivo generar modelos de predicción que permitan emular el comportamiento de la dilución a escala operacional, mediante evaluación de condiciones de entorno y variables operacionales. Para la construcción y calibración de los modelos se utilizan las bases de datos de la extracción histórica (1994-2011) de las minas El Salvador y Andina, pertenecientes a Codelco.

Los modelos predictivos de entrada de dilución utilizan la regresión logística multivariable, que permite el pronóstico de la ocurrencia del fenómeno de la entrada de dilución en base a una serie de variables predictoras. Las variables predictoras resultantes, luego del análisis univariable y multivariable, son: altura de columna in-situ, porcentaje de extracción de columna in-situ, porcentaje de toneladas extraídas uniformemente en 30 días y porcentaje de vecinos con dilución. Los modelos construidos son de buena calidad, con una precisión mayor al 80% en la predicción de la entrada de dilución a nivel de puntos de extracción. Además, los modelos minimizan de forma eficaz los errores asociados al PED (punto de entrada de la dilución) donde se obtienen errores totales del PED (RMSE) menores al 25%. Se comparan los modelos de regresión logística con herramientas de simulación como FlowSim 2.0 y Rebop 3.1 donde se observa que los modelos de predicción tienen mejores resultados.

### 1 Introducción

Block/panel caving son métodos subterráneos de extracción masiva de mineral fundamentados en la acción de la gravedad, donde el cuerpo mineral es socavado basalmente para iniciar el hundimiento natural de la columna. La propagación del hundimiento continuará en la medida que la roca fragmentada sea extraída, hasta alcanzar la superficie o un nivel previamente explotado (Brown, 2004), normalmente sobre o a un costado de la columna de mineral extraíble se encuentra

una zona de mineral sin valor económico suficiente para ser extraído, este material es llamado dilución.

La dilución es parte fundamental en la minería de block/panel caving, pues uno de los grandes objetivos en el diseño y operación es poder evitar o retrasar su entrada a los puntos de extracción, esto debido al impacto económico negativo que genera.

Una de las claves para poder entender el comportamiento de la dilución es establecer las variables determinantes que producen su ingreso, en ello diversos autores han postulado formas de poder controlar la extracción para evitar la dilución. DeWolfe (1981) plantea que es esencial una extracción tal que el espacio vacío, que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea propicio para la propagación de la fragmentación de material in-situ, sin que el volumen permita el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado. Julin (1992) propone que la extracción debe ser incrementada en igual porcentaje en cada línea de puntos de extracción (calle), el objetivo de esto es mantener un ángulo de contacto mineral-diluyente de 45°-50°.

Laubscher (1994, 2006) plantea una serie de variables de importancia en la entrada de dilución y una metodología que permite calcular el punto de entrada de la dilución (PED) y estimar la cantidad de dilución extraída luego de su ingreso. De acuerdo con Laubscher (2006) variables como: razón de volumen mineral respecto al diluyente, disposición y forma mineral-diluyente, diferencia fragmentación mineral-diluyente, interacción elipsoides de extracción, velocidad de extracción, alturas in-situ, diferencias de tonelajes extraídos entre puntos activos; tienen directa relación en la entrada de dilución. Además, propone una ecuación (6) para determinar el PED, basado en observaciones empíricas:

$$PED [\%] = \frac{H_c * S - HIZ}{H_c * S} * DCF * 100 \quad (6)$$

Donde  $H_c$  es la altura de columna in-situ,  $S$  es el esponjamiento alcanzado en la columna,  $HIZ$  corresponde a la altura de interacción de los elipsoides de extracción,  $DCF$  es una medida de la diferencia de tonelajes extraídos entre el punto de extracción y su tonelaje en un determinado período de tiempo.

Susaeta (2004), mediante la realización de experimentos y análisis de datos de extracción de minas de Codelco, postula que la entrada de dilución depende de la forma con que extrae el mineral, donde existe tres tipos de flujo de mineral: aislado, aislado-interactivo e interactivo.

Cuando el flujo es aislado, la dilución entra más temprano en la extracción, en cambio si el flujo es interactivo la dilución entra de forma mucho más tardía, el flujo aislado-interactivo tiene un comportamiento intermedio entre los otros 2. Con esto el autor plantea un parámetro para determinar si el flujo es interactivo, o en otras palabras si la extracción es uniforme, llamado índice de uniformidad (IU), como se aprecia en ecuación (7), con esto se puede calcular el porcentaje de toneladas extraídas uniformemente. El autor en base a datos mina comprueba que entre más uniforme sea la extracción más tardía en la entrada de dilución y menos porcentaje de dilución se extrae, por ende, recomienda extraer lo más uniforme posible.

$$I.U. = \Delta + \Gamma * \frac{t_p - t_{min}}{t_{max}^2 * n} * \sum (t_{max} - t_i) \quad (7)$$

Donde:

- $\Delta$ : Número de vecinos inactivos.
- $\Gamma$ : Factor de normalización igual a 99/89.
- $t_p$ : Tonelaje extraído del punto en un período de tiempo determinado.
- $t_i$ : Tonelaje extraído del punto  $i$  perteneciente a la vecindad del punto en cuestión en el período de tiempo determinado.
- $t_{max}$ : Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $t_{min}$ : Tonelaje mínimo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $n$ : Número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto en cuestión.

Castro y Paredes (2014) proponen, mediante el análisis de datos de las minas El Salvador y Andina de Codelco, que existen tres tipos de mecanismos de entrada de dilución: vertical, lateral y producto de un estallido de aire luego de la colgadura del air gap. La dilución vertical se produce cuando la fuente de dilución se ubica encima del panel a explotar y existe una propagación regular del cave back hacia ella, la dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical. La dilución lateral se produce cuando el panel en cuestión se ubica al costado de un sector previamente explotado, a medida que su secuencia avanza, el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire suficientemente grande para permitir el ingreso de material quebrado y el ángulo de la pila de material granular permite el flujo lateral del material, éste viajará hasta los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado. Finalmente, si se produce una colgadura del cave back en el panel y producto de esto se produce un estallido de aire, la dilución entrará violentamente (de Nicola & Fishwick, 2000).

Existen una serie de softwares que permiten determinar la dilución como: PC-BC, que tiene como dato de entrada el PED y con eso calcula la cantidad de dilución en plan de producción, mediante una metodología netamente empírica (Diering, 2000); otras herramientas de simulación de flujo gravitacional son Rebop (Cundall et al, 2000) y FlowSim (Castro & Whiten, 2007), que dan como resultados el PED y la cantidad de dilución en el plan de producción. Se han realizado pruebas a escala industrial de estos simuladores, Castro y Paredes (2012) concluyen, mediante comparación con datos reales de las minas El Salvador y Andina de Codelco, que Rebop 3.1 (Pierce, 2008) es útil para la simulación de la dilución de origen vertical en el largo plazo, pero no logra emular de forma precisa el fenómeno de la dilución en el corto plazo ni la dilución producida por mecanismos laterales. Similar condición presenta FlowSim 2.0 (Valencia, 2014), aunque con mejores resultados que Rebop

Con la revisión del estado del arte respecto a la predicción de la entrada de dilución en minería de block/panel Caving, se puede concluir que está basada en reglas empíricas (Laubscher; PCBC), los experimentos de laboratorio (Susaeta) y simuladores de flujo (Rebop; FlowSim). Los simuladores resultan ser más confiables y robustos, pero aun así su enfoque está en el largo plazo, por eso no logran emular el fenómeno de la dilución en el corto plazo ni el mecanismo de dilución lateral. Por lo que en este trabajo se propone el uso de herramientas estadísticas multivariadas para determinar las variables que influyen en la entrada de dilución y mediante ellas establecer el riesgo existente para la entrada de dilución, y así poder tomar medidas que impidan o retrasen su ingreso. El método estadístico multivariable más adecuado es la regresión logística porque es útil para analizar datos que incluyen una variable de respuesta binaria (Hosmer et al, 2013), como es el caso de la entrada de la dilución. La regresión logística multivariable ha sido por años utilizada con gran éxito en ciencias médicas y sociales, recientemente se ha ocupado en minería de caving como en la predicción entrada de agua-barro a los puntos de extracción (Garcés et al, 2016).

## 2.1 Base de datos

La base de datos a estudiar corresponde a la extracción histórica (1994-2011) de las minas El Salvador (Figura 22), que cuenta con los sectores Inca Central Oeste (ICW) e Inca Central Este (ICE), y de la mina Andina, con el sector LHD (Figura 23); ambas pertenecientes a Codelco. Cada mina tiene diferentes formas de medir la dilución, en el caso de El Salvador se reporta la cantidad de limonita en cada punto de extracción por parte del personal de control de producción mina (CPM); mientras que en el caso de Andina se registra la cantidad de riolita y de material quebrado en cada punto de extracción, a partir del año 2006. Para El Salvador y Andina, la información sobre el marcador se reporta cada 2000 toneladas.

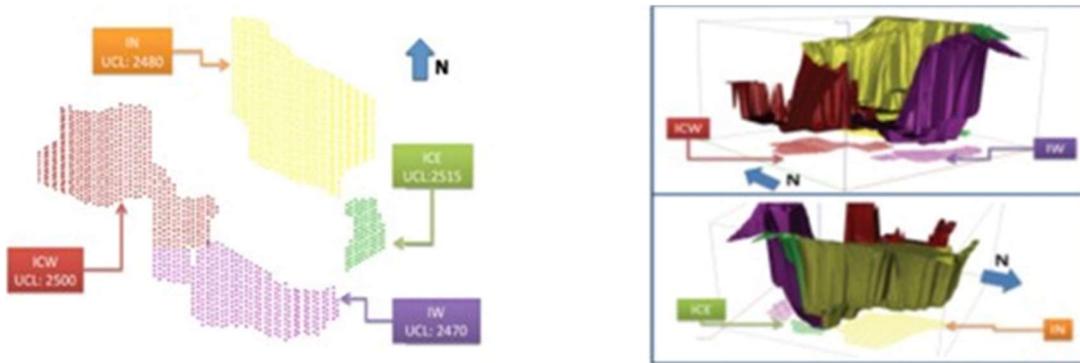


Figura 22: Vista en planta y perfil. Mina El Salvador (Castro y Paredes, 2012)

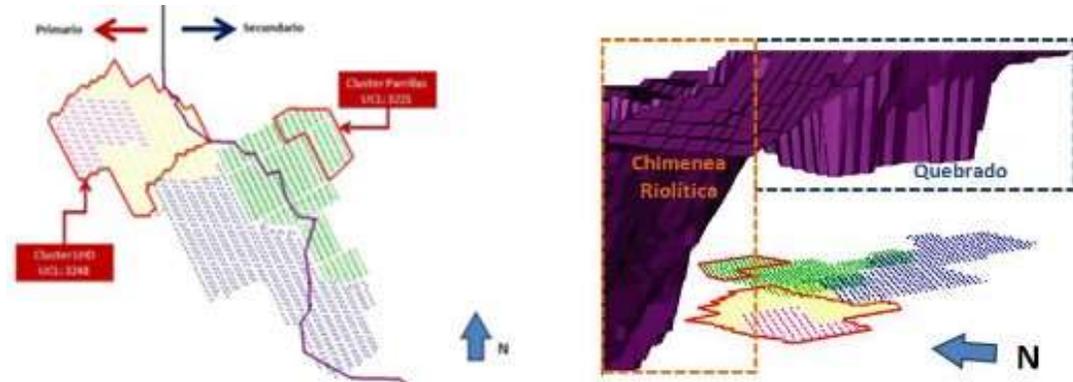


Figura 23: Vista en planta y perfil. Mina Andina (Castro y Paredes, 2012)

## 2.2 Definición de la variable entrada de dilución

De forma similar a la utilizada por Castro y Paredes (2012), se considera la entrada de dilución como el punto donde ingresa la dilución acumulada al 3%, como se muestra en la Figura 24, pues representa un volumen robusto de datos, eliminando aquellas entradas no significativas, mientras que criterios de 5% ó 10% generan pérdidas de información. La dilución acumulada se calcula, para un período  $t$ , como el tonelaje acumulado de dilución dividido en el total de tonelaje acumulado, como se muestra en la ecuación 8. Además, se toma la dilución solamente en los puntos donde ingresa bajo el 100% de la columna in-situ extraída, pues se desea determinar la entrada de

dilución temprana, la cual es la que afecta negativamente a los proyectos mineros, además en el sector LHD de Andina se considera como diluyente la suma de riolita con quebrado.

En la Tabla 9, se hace un resumen de las características de cada uno de los sectores analizados, donde se observa que existe cantidad importante de puntos con dilución. En la Figura 25, se muestran gráficamente los puntos con dilución, donde se ve claramente que la dilución ingresa a un conjunto de puntos y no aisladamente a uno solo.

$$\text{Dilución acumulada [\%]} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{dilución}_i * \text{tonelaje}_i}{\sum_{i=1}^n \text{tonelaje}_i} \quad (8)$$

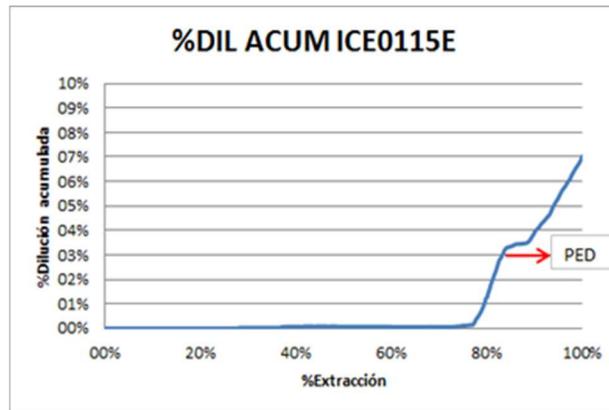


Figura 24: Dilución acumulada y ejemplos de entrada de dilución

Tabla 9: Resumen puntos con dilución, sectores analizados

Sector	Puntos con extracción	Puntos con dilución	Porcentaje puntos con dilución	PED promedio [%]
ICE	108	44	40.7[%]	49 <sup>+</sup> [32]
ICW	471	77	16.3[%]	68 <sup>+</sup> [25]
LHD	397	117	29.5[%]	46 <sup>+</sup> [21]

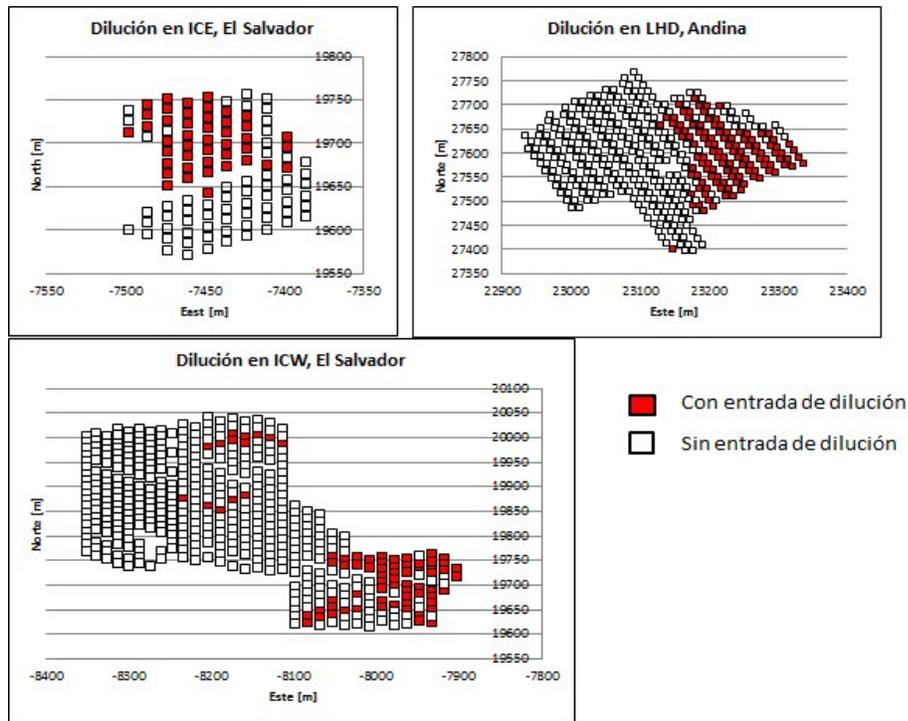


Figura 25: Dilución en sectores analizados

### 2.3 Definición variables claves en el ingreso de dilución

Para hacer un modelo de riesgo o probabilidad de ingreso de dilución, de acuerdo con la regresión logística (ecuación 5), es necesario plantear una serie de variables independientes o predictoras, las cuáles se basan en el estudio hecho por autores como Laubscher (2000), Susaeta (2004), Castro y Paredes (2012), etc. Estas variables tendrán su importancia de acuerdo con su coeficiente o valor  $\beta$ , que tome cada una de ellas (ecuación 9). Con el valor de  $\beta$  se puede introducir el concepto de odds ratio o razón de probabilidad, que indica el cambio de probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dado un cambio en una variable, en la ecuación (10) se muestra cómo se calcula las odds ratio en regresión logística. Las variables estudiadas son: uniformidad del tiraje, velocidad de extracción, vecinos con dilución, altura de columna in-situ y porcentaje de columna in-situ extraída, como se muestra en la Tabla 10. La elección de las variables a estudiar está sujeta también a la base de datos entregada, pues con una base de datos más completa se pueden estudiar otras variables como: fragmentación, medida de precondicionamiento (PA), humedad, mediciones de cave back (conexión de caving).

$$P(y = 1|x) = p(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}} \quad (9)$$

$$\text{Odds ratio} = e^{\beta_i \Delta x} \quad (10)$$

Tabla 10: Posibles variables predictoras

Variable	Tipo	Unidad	Definición	Explicación (Sentido esperado del $\beta$ )
Uniformidad del tiraje	Continuo	[%]	Es el porcentaje de toneladas extraídas uniformemente en relación con el total de toneladas extraídas en el último mes previo a la evaluación. Mediante el índice de uniformidad propuesto por Susaeta.	$\beta$ negativo: A mayor uniformidad del tiraje, es decir, mayor cantidad de toneladas extraídas de manera uniforme, menor será la probabilidad que ingrese dilución al punto de extracción (Susaeta, 2004).

Velocidad de extracción	Continuo	[ton/(m <sup>2</sup> *día)]	Es la velocidad promedio de los últimos 30 días previos a la evaluación.	$\beta$ positivo: A mayor velocidad de extracción, mayor probabilidad de entrada de dilución, en especial si hay cambios de velocidad de un período a otro (Laubscher, 2006), o notables diferencias de velocidad entre puntos de extracción.
Vecinos con dilución	Continuo	[%]	Es el porcentaje de vecinos (en la vecindad próxima, es decir, los 6 puntos más cercanos), que tienen dilución previa a la evaluación.	$\beta$ positivo: A mayor porcentaje de vecinos con dilución, mayor será la probabilidad de entrada de dilución, pues se espera que exista una contaminación lateral de dilución por parte de la vecindad a un punto de extracción. Un criterio similar al usado en la predicción de entrada de agua-barro a los puntos de extracción (Garcés et al., 2016).
Altura de columna in-situ	Continuo	[m]	Es la altura en metros, del mineral in-situ.	$\beta$ negativo: A mayor altura de columna in-situ, menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues existe una mayor separación entre la extracción inicial y la fuente de dilución (Laubscher, 2006).
Columna in-situ extraída	Continuo	[%]	Es el porcentaje de columna in-situ extraída previa a la evaluación.	$\beta$ positivo: A mayor % columna in-situ extraída, mayor probabilidad de entrada de dilución, pues se está más cerca del quebrado o de la fuente de dilución (Laubscher, 2006).

### 3 Metodología: construcción de modelos de regresión logística

El objetivo de este trabajo es poder evaluar en forma diaria la entrada de dilución a los puntos de extracción, para ello es necesario seguir una serie de etapas que permita construir los modelos predictivos y poder evaluarlos y calíbralos. La metodología se basa en la construcción de un modelo de regresión logística para eventos raros (King & Zeng, 2001), pues la variable dependiente es la primera entrada de dilución (acumulada al 3%), la cual representa menos 0.1% del total de extracciones, este tipo de metodología ha sido usada en la predicción de entrada de agua-barro (Garcés, 2017). Los pasos para la construcción y evaluación de los modelos son los siguientes:

#### a) Construcción base de datos para eventos raros

Se selecciona un 25% de la base de datos con la presencia del evento, es decir, la entrada de dilución; y un 75% de la base de datos que no presenta el evento (King & Zeng, 2001).

#### b) Evaluación regresión logística univariable

Todas las variables candidatas pasan por un test univariable, donde se evalúa si pueden o no entrar en el modelo de regresión logística multivariable. Para ello, deben tener significancia estadística, o sea, su valor p debe ser menor a 0.2, si no logra esto la variable queda descartada.

#### c) Modelos regresión logística multivariable

Se agregan a un modelo de regresión logística multivariable, las variables que logran pasar el test univariable. Para decidir si una variable ingresa o no al modelo deben cumplir con que su valor p debe ser menor 0.1, además ésta debe tener lógica, es decir, el sentido del  $\beta$  tiene que ser el propuesto en la Tabla 10. Las variables que cumplen estos 2 parámetros pueden ingresar al modelo de regresión logística.

#### d) Evaluación modelo de regresión logística

Para poder evaluar un modelo de regresión existen muchos métodos, uno de los más utilizados es área bajo la curva ROC (Fawcett, 2006), donde se busca maximizar el área bajo la curva, modelos

con un área bajo la curva ROC con valores mayores 0.8 son de buena calidad en la discriminación del evento.

**e) Calibración modelo de regresión logística**

La calibración del modelo se realiza comparando los datos mina con la entrada de dilución modelada, dependiendo del valor de la probabilidad de corte. La probabilidad de corte permite que los puntos sean calificados con la presencia o no de dilución (valor 1 ó 0). Extracciones con valores sobre la probabilidad de corte implica que ingresa dilución al punto de extracción, mientras que extracciones con valores bajo la probabilidad de corte implica que no ingresa dilución al punto de extracción. Se simula el modelo construido para distintas probabilidades de corte y luego se comparan para encontrar la probabilidad de corte óptima que maximice la precisión, sensibilidad y especificidad; y minimice el error asociado al PED.

Para calcular los valores de sensibilidad, especificidad y precisión, se recurre a la metodología de matrices de contingencia, ésta se basa en el porcentaje de eventos correctamente estimados, de acuerdo con el contraste entre los estados de eventos predichos y observados. De acuerdo a Fawcett, (2006). La construcción de la matriz de contingencia permite el cálculo de cuatro posibles resultados:

- i) si el valor real es positivo y se clasifica como positivo, entonces se cuenta como un verdadero positivo (VP);
- ii) si se clasifica como negativo, se cuenta como falso negativo (FN). En consecuencia, si el valor real es negativo y se clasifica como negativo,
- iii) se cuenta como un verdadero negativo (VN);
- iv) de lo contrario, si se clasifica como positivo, se cuenta como un falso positivo (FP) (Fawcett, 2006).

Esto se resume en la Tabla 11.

*Tabla 11: Matriz de contingencia*

		Casos reales	
		Positivo	Negativo
Casos hipotéticos	Positivo	<b>Verdadero Positivo (VP)</b>	<b>Falso Positivo (FP)</b>
	Negativo	<b>Falso Negativo (FN)</b>	<b>Verdadero Negativo (VN)</b>

Con esto se pueden calcular la sensibilidad (o tasa de verdaderos positivos), la especificidad (también conocida como tasa de verdaderos negativos) y la precisión del modelo. Para ello se utilizan las ecuaciones (10, 11, 12) a continuación (Pierce C. S., 1884):

$$Sensibilidad = \frac{VP}{VP+} \quad (11)$$

$$Especificidad = \frac{VN}{FP+VN} \quad (12)$$

$$\text{Precisión} = \frac{VP+V}{VP+FN+FP+VN} \quad (13)$$

Además, de maximizar la sensibilidad, especificidad y precisión, los cuales analizan la efectividad del modelo de predecir el estado final (largo plazo) del punto de extracción. Se debe tener un estadístico que permite evaluar que tan eficiente es el modelo en predecir el PED, pues también se desea que el modelo sea capaz de predecir la entrada de dilución en el corto plazo. Para ello, se calcula el error cuadrático medio (RMSE) del PED, como se muestra en la ecuación 14, este estadístico permite hacer una comparación entre el PED real y modelado y determinar qué tan buena es la estimación. El RMSE tiene la unidad de medida de la variable, en este caso porcentaje, se busca que el RMSE sea el menor posible, donde a lo menos se espera que sea menor al que entregan los softwares Reboop 3.1 (Castro & Paredes, 2012) y FlowSim 2.0 (Valencia, 2014). Otra forma de evaluar la predicción a corto plazo es mediante el grado de correlación entre los PED modelados y los PED reales, esto se puede traducir a un histograma de frecuencia relativa de los errores del PED entre real y modelado. Se espera que el modelo calibrado sea válido si la probabilidad de corte para establecer la distribución del error tienda a cero.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(V_{modelo\ i} - V_{real\ i})^2}{N}} \quad (14)$$

## 4 Resultados y discusiones modelos de regresión logística

### 4.1 Análisis regresión logística univariable

Se realiza el análisis univariable para determinar las variables que pueden ingresar al modelo multivariable. Las variables logran pasar el test univariable (con el criterio del valor  $p < 0.20$ ) y podrían ingresar al modelo multivariable, como se observa en las tablas 12, 13 y 14.

*Tabla 12: Análisis univariable, ICE El Salvador*

Variable	Significancia estadística (valor p)	$\beta$
Uniformidad del tiraje [%]	<0.001	-1.23
Velocidad de extracción [ton/(m <sup>2</sup> *día)]	<0.001	2.39
Vecinos con dilución [%]	<0.001	5.07
Altura de columna in-situ [m]	<0.001	-0.01
Columna in-situ extraída	0.252	0.65

*Tabla 13: Análisis univariable, ICW El Salvador*

Variable	Significancia estadística (valor p)	$\beta$
Uniformidad del tiraje [%]	<0.001	-1.69
Velocidad de extracción [ton/(m <sup>2</sup> *día)]	<0.001	4.76
Vecinos con dilución [%]	<0.001	5.29
Altura de columna in-situ [m]	<0.001	-0.03
Columna in-situ extraída	<0.001	1.89

**Tabla 14: Análisis univariable, LHD Andina**

Variable	Significancia estadística (valor p)	$\beta$
Uniformidad del tiraje [%]	0.01	-1.14
Velocidad de extracción [ton/(m <sup>2</sup> *día)]	0.01	0.99
Vecinos con dilución [%]	<0.001	6.69
Altura de columna in-situ[m]	<0.001	-0.02

Como se aprecian en las tablas 12, 13, 14, las variables propuestas en la sección 2 aprueban el test univariable, con coeficientes ( $\beta$ ) que están acorde a la teoría, lo que indica que las variables si tienen una incidencia en la ocurrencia del fenómeno de ingreso temprano de dilución. La excepción es la columna in-situ extraída en el sector ICE de El Salvador. Esto se debe al tipo de ingreso de dilución que afecto al sector, pues como expuso Castro y Paredes (2012) hubo un ingreso de dilución lateral, por ende, la entrada de dilución está a bajos porcentajes de columna in-situ extraída y por eso no tiene un resultado estadísticamente significativo.

## 4.2 Modelos de entrada de dilución

Con modelos de regresión logística multivariable se busca encontrar las variables que logran predecir la entrada de dilución, como también su probabilidad de ingreso. Los modelos se construyen con las variables que lograron pasar el test univariable y tengan significancia estadística (valor p), en el modelo multivariable, menor 0.1 y que el sentido del  $\beta$  sea lógico. Los modelos de ingreso de dilución se muestran en las tablas 15, 16 y 17.

**Tabla 15: Modelo Inca Central Este (ICE)**

Variables	Valor p	$\beta$	Odds ratio (comentario)	Área bajo la curva ROC
Vecinos con dilución [%]	<0.001	4.793	Un aumento de 20% en la cantidad de vecinos con dilución, implica 2.26 veces más probabilidad de ingreso de dilución (+126%).	0.892
Altura de columna in-situ [m]	<0.001	-0.008	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica 0.92 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-8%).	
Uniformidad del tiraje [%]	0.018	-0.663	Un aumento del 10% en la uniformidad del tiraje, implica 0.94 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-6%).	
Constante	-	-0.354	-	

**Tabla 16: Modelo Inca Central Oeste (ICW)**

Variables	Valor p	$\beta$	Odds ratio (comentario)	Área bajo la curva ROC
Vecinos con dilución [%]	<0.001	7.752	Un aumento de 20% en la cantidad de vecinos con dilución, implica 4.71 veces más probabilidad de ingreso de dilución (+371%).	0.919
Altura de columna in-situ [m]	<0.001	-0.029	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica 0.75 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-25%).	
Uniformidad del tiraje [%]	0.034	-0.655	Un aumento del 10% en la uniformidad del tiraje, implica 0.94 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-6%).	
Columna in-situ extraída [%]	0.055	1.393	Un aumento de 10% de la columna in-situ extraída, implica, 1.15 veces más probabilidad de ingreso de dilución (+15%).	
Constante	-	1.236	-	

**Tabla 17: Modelo sector LHD**

Variables	Valor p	$\beta$	Odds ratio (comentario)	Área bajo la curva ROC
Vecinos con dilución [%]	<0.001	4.990	Un aumento de 20% en la cantidad de vecinos con dilución, implica 2.71 veces más probabilidad de ingreso de dilución (+171%).	0.890
Altura de columna in-situ [m]	<0.001	-0.011	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica 0.90 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-10%).	
Uniformidad del tiraje [%]	0.066	-1.294	Un aumento del 10% en la uniformidad del tiraje, implica 0.88 veces menos probabilidad de ingreso de dilución (-12%).	
Columna in-situ extraída [%]	<0.001	2.985	Un aumento de 10% de la columna in-situ extraída, implica, 1.35 veces más probabilidad de ingreso de dilución (+35%).	
Constante	-	-1.401	-	

La velocidad de extracción no resulta ser una variable predictora del fenómeno de entrada de dilución, pues no tiene significancia estadística, según las bases de datos estudiadas.

Los modelos multivariantes de regresión logística tienen un área bajo la curva ROC, que permite calificarlos de buena calidad. Como se observa existe diferencias entre las variables que ingresan a los modelos, mientras en ICE las variables son: vecinos con dilución, altura de columna in-situ y uniformidad del tiraje; y en ICW y LHD a las anteriormente mencionadas se suma el porcentaje de columna in-situ extraída.

En relación con las odds ratio, se aprecia en las tablas 15, 16 y 17 que los vecinos con dilución es la variable de mayor importancia para predecir la entrada de dilución. Esto tiene mucho sentido, pues al haber dilución en un punto, está no sólo afecta a ese punto sino a todo un sector, produciéndose una dilución lateral entre los puntos de extracción, y eso es lo que representa esta variable. Por eso una de las principales preocupaciones en la extracción debe ser no permitir el ingreso de dilución a un punto de extracción, para ello los modelos entregan otras variables, que pueden ser modificables en el diseño, planificación y operación de la mina, como son la altura de columna in-situ y la uniformidad del tiraje.

Al realizar un análisis comparativo de los coeficientes ( $\beta$ ), se observan diferencias entre ellos (Tabla 18). Esto se debe a las diferencias geológicas, de diseño y operacionales, que no son replicables en todas las faenas. Por ende, pensar en generalizar un modelo, que sirva en cualquier faena, es complejo de realizar y requiere de más estudios de variables y análisis de ellas.

**Tabla 18: Comparación  $\beta$  de los modelos**

Variable	Coeficiente en el modelo ( $\beta$ )		
	ICE, El Salvador	ICW, El Salvador	LHD, Andina
Vecinos con dilución [%]	4.793	7.752	4.990
Altura columna in-situ [m]	-0.008	-0.029	-0.011
Uniformidad del tiraje [%]	-0.663	-0.665	-1.294
Columna in-situ extraída [%]	-	1.393	2.985

### 4.3 Calibración modelos de entrada de dilución

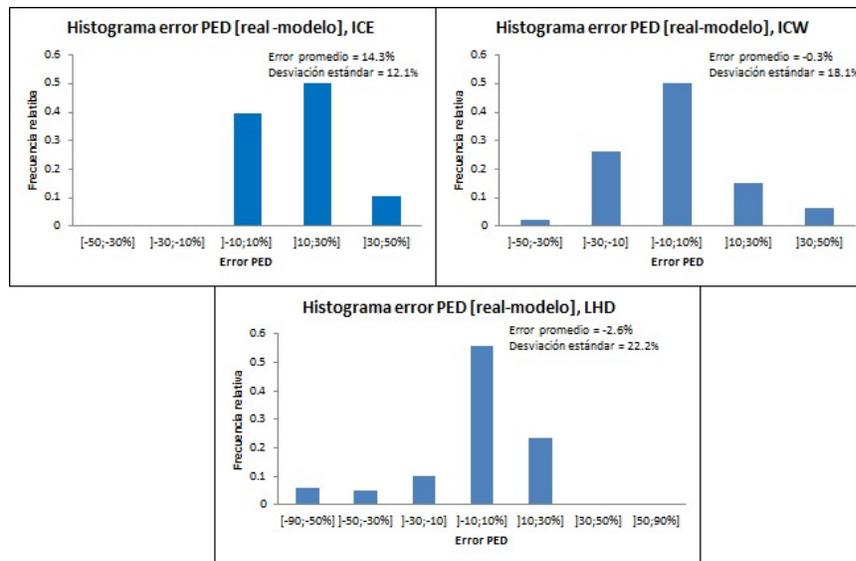
Luego de analizar los modelos para distintas probabilidades de corte, se encuentran las que maximizan la predicción correcta de la entrada de dilución. Los modelos resultan ser de alta

precisión (sobre el 85%), sensibilidad y especificidad; y de un error estimado del PED bajo (RMSE), como se aprecia en la Tabla 19.

**Tabla 19: Resultados Calibración Modelos**

Modelo	Probabilidad de corte	Precisión [%]	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	RMSE PED [%]
ICE	0.5	91.6	86.4	95.2	13.7
ICW	0.85	88.8	61.3	93.9	14.1
LHD	0.65	86.6	84.6	87.5	24.5

Los errores del PED, de los puntos correctamente estimados con dilución o verdaderos positivos (VP), se encuentran cercanos a cero, a excepción del modelo de ICE, donde los errores están desplazados a la derecha, es decir, existe la tendencia a predecir de forma más temprana a la real el PED. En los sectores ICW y LHD, no existe la tendencia ni sobrestimar ni subestimar el PED, pero tiene una mayor desviación de los errores, aun así, se concentran en su gran mayoría en el rango  $\pm 30\%$ , como se ve en la Figura 26.



**Figura 26: Histograma errores PED de los modelos**

Entonces los modelos son eficientes en predecir de forma correcta la entrada de dilución a los puntos de extracción. Con un enfoque en el corto plazo, pues es capaz de acertar, con un nivel bajo de error, el PED de cada punto de extracción.

Al comparar estos resultados a los obtenidos por Rebo3.1 y FlowSim 2.0 (Valencia, 2014) donde la precisión no supera el 82% y el error (RMSE) asociado al PED no baja del 35%, se justifica la creación de estos modelos pues mejoran en forma significativa la precisión y disminuyen los errores en relación con los softwares de modelamiento de flujo gravitacional.

## 5 Discusión modelos multivariables de entrada de dilución

Con respecto al desarrollo de esta investigación, se cumple con el objetivo de predecir de forma efectiva la entrada de dilución, con enfoque en el corto plazo, con el propósito de poder superar la eficiencia de las herramientas actuales. Dentro del estudio es que incorpora la variable operacional de uniformidad del tiraje, la cual permite tomar decisiones operacionales que reduzcan el riesgo de entrada de dilución.

Las principales ventajas de esta investigación resultan ser:

- La aplicabilidad de la metodología de construcción de modelos de regresión logística para predecir la entrada de dilución a los puntos de extracción. Con un resultado eficiente en 3 minas con diferentes condiciones. Se recomienda el uso de esta metodología para evaluar el riesgo de la entrada de dilución en otras faenas de block/panel caving.
- Encontrar las variables claves para entender la entrada de dilución, una forma de poder evitar o retrasar la entrada de dilución, mediante aspectos operacionales, de entorno y diseño.
- La evaluación del riesgo de entrada de dilución se puede llevar a cabo en forma diaria, permitiendo evaluar planes en el corto plazo. Permitiendo tomar medidas en la operación de la mina.
- Existen diferencias entre las variables de los modelos dependiendo del tipo de mecanismo que gobierna el ingreso de dilución a la mina.
- La herramienta utilizada en esta investigación resulta ser más eficiente, en la predicción de la entrada de dilución, que los simuladores de flujo gravitacional (FlowSim 2.0 y Rebop 3.1).

Sin embargo, esta investigación tiene limitaciones relevantes, que se describen a continuación:

- El enfoque de esta investigación es el análisis de datos mina, no simular el proceso de caving mediante el flujo gravitacional. Por ende, no es un reemplazo a los simuladores de flujo sino un complemento.
- La investigación se basa fundamentalmente en la correcta toma de datos, por ende, se requiere que este proceso sea lo más eficaz posible. En este sentido resulta relevante el poder medir de forma automática las diferentes variables del problema en estudio a través de sensores.
- Existen una serie de variables que podrían resultar importantes (como la fragmentación, medidas de preacondicionamiento, humedad, mediciones del cave back) para predecir la entrada de dilución, que no se incluyen debido a que no se encuentran disponibles en las bases de datos analizadas. Es por ello que se hace necesario otra forma de estudiar estos fenómenos, como es por ejemplo el modelamiento físico.
- Los modelos de regresión logística solo permiten predecir el PED y no así la cantidad de dilución que tendrá cada punto de extracción.
- Aun no existe una operación minera que haya utilizado esta herramienta y haya modificado su diseño y planificación en consecuencia, por ende, queda por estudiar la correcta aplicabilidad de los modelos de entrada de dilución.

## 6 Conclusiones

En este artículo la construcción y validación de modelos multivariados de entrada de dilución ha sido presentado y discutido. La metodología empleada es la regresión logística multivariable, que ha permitido la incorporación de variables claves asociadas a la entrada de dilución. Las variables claves dependen del tipo de mecanismo de entrada de dilución que tiene cada mina, cuando existe un mecanismo de entrada vertical de dilución, las variables claves son: uniformidad del tiraje, altura de mineral primario, porcentaje vecinos con dilución, porcentaje columna in-situ extraída; mientras que, para el mecanismo de entrada lateral de dilución, las variables claves son: uniformidad del tiraje, altura de columna in-situ y porcentaje vecinos con dilución.

La calibración muestra que los modelos son altamente precisos (sobre 85%) y tienen bajos errores asociados al PED (menos de 20%), superando las herramientas actuales. Por ende, son recomendables para predecir la entrada de dilución con enfoque en el corto plazo.

Los modelos entregan la importancia de cada variable y por ende se pueden tomar decisiones de diseño y operacionales que permitan reducir el riesgo de entrada de dilución a los puntos de extracción. Como, por ejemplo, no extraer altura de columnas in-situ muy bajas o tener un tiraje lo más uniforme posible.

## **7 Bibliografía**

Brown, E. 2004. Block Caving Geomechanics. 2nd ed. Brisbane: Julius Kruttschnitt Minerals Research Center, University of Queensland.

Castro, R., Whiten, W. 2007. A new cellular automaton to model gravitu flow in block caving based on physical modeling observations. En proceedings of the 33rd International Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industry (APCOM), ed: Eduardo Magri, Gecamin Ltda, Santiago de Chile, pp. 233-241.

Castro, R., Paredes, P. 2012. Comparison of REBOP to large panel caving at Codelco's operations. Final Internal Technical Report. Toronto, Canada: Mass Mining Technology Project II.

Castro, R., Paredes, P. 2014. Empirical observations of dilution in panel caving. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol 114, no 06, pp. 455-462.

Cundall, P., Mukundakrishnan, B., Lorig, L. 2000. REBOP (Rapid Emulator based on PFC3D) Formulation and User's Guide. Brisbane: JKRCM & ITASCA Consulting Group, Inc.

De Nicola, R., Fishwick, M. 2000. An Underground Air Blast, Codelco Chile-División El Salvador. En MassMin 2000, ed: Gideon Chitombo, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, pp. 279-288.

DeWolfe, V. 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. En Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, ed: D.R. Stewart, Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 729-735.

Diering, T. 2000. PC-BC: A block cave design and draw control system. En MassMin 2000, ed: Gideon Chitombo, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, pp. 469-484.

Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern recognition letters, vol. 27, no. 8, pp. 861-874.

Garcés, D., Castro, R., Valencia, M.E., Armijo, F. 2016. Assesment of early mud entry risk for long term cave mining applications. En U-Mining 2016, ed: R. Castro & M.E. Valencia, Universidad de Chile, Santiago de Chile, pp. 439-451.

Hosmer, D., Lemeshow, S., Sturdivant., 2013. Applied logistic regression. Third Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.

Julin, D. 1992. Block Caving. En SME Mining Engineering Handbook, 2nd edition, ed: H.L. Hartman, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, pp. 1815-1836.

King, C., Zeng, L., 2001. Logistic Regression in Rare Events Data. Political Analysis, vol. 9, no. 2, pp. 137-163.

Laubscher, D. 1994. Cave Mining – the state of the art. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 90, no. 10, pp. 279-293.

Laubscher, D. 2006. Cave Mining Handbook. De Beers Group, South Africa, pp. 115-118.

Pierce, C.S. 1884. The numerical measure of the success of predictions. Science, vol. 4, no. 93, pp. 453-454.

Pierce, M. 2008. REBOP Version 3.1 For Block Caving User Guide. Itasca, Minneapolis.

Susaeta, A. 2004. Theory of gravity flow (Part 1). En MassMin 2004, ed: A. Karzulovic, M. Alfaro, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago de Chile, pp. 167-172.

Susaeta, A. 2004. Theory of gravity flow (Part 2). En MassMin 2004, ed: A. Karzulovic, M. Alfaro, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago de Chile, pp. 173-178.

Valencia, M. (2014). Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, Universidad de Chile.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

La investigación permite relacionar el fenómeno de entrada de dilución con sus principales variables, a través de experimentación física y empírica. Las principales conclusiones de esta tesis son las siguientes:

- Las principales variables que influyen en el comportamiento de la dilución son: la granulometría, el control del tiraje, el porcentaje de columna in-situ extraída, la cantidad de dilución de sobrecarga y la cantidad de puntos que ya presenten dilución.
- En la experimentación física si existe migración de finos/dilución a diferencia de lo ocurrido con los experimentos de Irribarra (2014). Esto se debe a que las curvas granulométricas tienen un menor coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), lo que permite que existan espacios disponibles en el mineral grueso que permiten la percolación. Esta relación entre la amplitud de la curva granulométrica también es estudiada en la tesis, donde se establece que cuando más amplia es la curva granulométrica del mineral grueso, es decir, manteniendo el  $d_{100}$  y  $d_{80}$ , pero disminuyendo el  $d_{50}$  y el  $d_{10}$ , implica un retraso en la entrada de dilución y una menor cantidad de dilución extraída en el tiempo.
- El tiraje es una variable clave para entender el comportamiento, esto se pudo comprobar tanto experimental como empíricamente.
- Al estudiar las zonas de extracción, experimentalmente, no se aprecia mayores diferencias entre la zona que genera el mineral grueso y fino, esto implica que la zona de extracción está definida por la granulometría gruesa, pues se hubiese esperado que la granulometría fina generará un angostamiento evidente en la zona de extracción en altura.
- La realización de los experimentos deja una cantidad y calidad de datos importante que permitirá ayudar a calibrar un software de flujo gravitacional.
- Los modelos de regresión son una buena herramienta para predecir el comportamiento de la dilución en el corto y mediano plazo a través de variables claves. Los resultados entregaron modelos con una precisión mayor al 80% y un bajo error del PED. La mayor dificultad del modelamiento empírico es la falta de información, en especial de variables como la fragmentación.
- El modelamiento empírico (a través de datos mina) entrega excelentes resultados, de alta precisión y bajos errores, lo que permite un modelamiento que puede ser usado con altos grados de confiabilidad para apoyar a la planificación de corto y mediano plazo. La principal dificultad se encuentra en la falta de datos, en especial de variables claves, lo que debe incitar a las operaciones a recolectar mayor cantidad y mejor calidad de datos.

### 5.2. Recomendaciones

Las principales recomendaciones que entrega esta tesis son las siguientes:

- La experimentación física a escala permite estudiar fenómenos muy importantes en la minería de caving, en este caso la entrada de dilución, en forma de migración de finos. Por ende, se recomienda seguir experimentando de esta forma pues permite controlar muchas variables claves.

- Para comprobar que zonas de extracción no cambian en altura a pesar de un cambio granulométrico, se recomienda realizar experimentación que representa una mayor altura de columna, pues la experimentación presentada solo representa una altura de 50 m.
- Una de las principales variables que influyen en el comportamiento de la dilución es la granulometría del mineral, en especial, sus tamaños menores ( $d_{50}$  o menor). Por ende, se recomienda tener curvas granulométricas del mineral con presencia de tamaños menores.

# CAPÍTULO 6

## BIBLIOGRAFIA

Baez F. (2016). Intelligent Mining - the Way of the Future. En: Proceedings of MassMin 2016. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Sydney, pp. 3-8.

Bridgwater, J., Cooke, MH. and Scott, AM. 1978. Inter-particle percolation: equipment development and mean percolation velocities. En: Transactions of the Institute of Chemical Engineers, vol. 56 (3), pp. 157-167.

Brown, E. 2004. Block Caving Geomechanics. 2nd ed. Brisbane: Julius Kruttschnitt Minerals Research Center, University of Queensland.

Catalan, A. 2015. Implementation and assessment of intensive preconditioning for cave mining applications. PhD thesis. University of Queensland.

Castro, RL 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD thesis, The University of Queensland, Brisbane.

Castro, R., & Whiten, W. 2007. A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observations. In APCOM 2007 Gecamin Ltda, pp. 233- 241.

Castro, R., Paredes, P. 2012. Comparison of REBOP to large panel caving at Codelco's operations. Final Internal Technical Report. Toronto, Canada: Mass Mining Technology Project II.

Castro, R., & Paredes, P. 2014. Empirical observations of dilution in panel caving. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. vol 114 (6), pp. 455-462.

Castro, R., Garcés, D., Brzovic, A., & Armijo, F. 2018. Quantifying Wet Muck Entry Risk for Long-term Planning in Block Caving. Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 51 (9), pp. 2965-2978.

Cho, G, Dodds J and Santamarina, J. 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering. Vol. 132, pp. 591-602.

Craig, R F. 2004. Craig's soil mechanics. Seventh Edition, pp. 71 -74.

Codelco. 2009. Estudio de factibilidad, Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, Principales Decisiones. Vicepresidencia Corporativa de Proyectos.

Codelco. 2012. Preacondicionamiento del macizo rocoso – Desarrollo tecnológico 1999-2010. Santiago de Chile: Ediarte S.A

Cundall, P., Mukundakrishnan, B., & Lorig, L. 2000. REBOP (Rapid Emulator based on PFC3D) Formulation and User's Guide. Brisbane: JKRCM & ITASCA Consulting Group, Inc.

De Nicola, R., Fishwick, M. 2000. An Underground Air Blast, Codelco Chile-División El Salvador. En: proceedings MassMin 2000, ed: Gideon Chitombo, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, pp. 279-288.

DeWolfe, V. 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. En Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, ed: D.R. Stewart, Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 729-735.

Diering, T. (2000). PC-BC: A block cave design and draw control system. En Proceedings MassMin 2000 Brisbane, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 469-484.

DeWolfe, V. 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. En: Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, ed: D.R. Stewart, Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 729-735.

Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern recognition letters, vol. 27, no. 8, pp. 861-874.

Garcés, D., Castro, R., Valencia, M.E., Armijo, F. 2016. Assesment of early mud entry risk for long term cave mining applications. En U-Mining 2016, ed: R. Castro & M.E. Valencia, Universidad de Chile, Santiago de Chile, pp. 439-451.

Hashim, M. 2011. Particle Percolation in block caving mines. PhD thesis. Australia, University of New South Wales

Hashim, H., Sharrock, G. 2012. Dimensionless percolation rate of particles in block caving mines. En: proceedings of MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Ontario.

Hosmer, D., Lemeshow, S., Sturdivant., 2013. Applied logistic regression. Third Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.

Hoz, K. 2007. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares grueso. Tesis para optar al grado de magister en minería. Universidad de Chile, Chile.

Iribarra S. 2014. Estudio experimental de migración de finos en minería de Caving. Memoria para optar al grado de ingeniero civil de Minas, Santiago, Chile: Universidad de Chile.

ISRM, B. 1985. Commission on testing methods, working group on revision of the point load test methodology, suggested method for determining point load strength. International J. RockMech. Min. Sei. & Geomech, vol. 22, no 2, p. 51-60.

Julin, D. 1992. Block Caving En: SME Mining Engeneering Handbook, 2nd edition, ed: H.L. Hartman, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, pp. 1815-1836.

- Labbé, E. (2014). Catastro de oportunidades I+D en innovación tecnológica para minería de Block/Panel Caving. Memoria para optar el título de ingeniero civil de minas. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Laubscher, D. 1994. Cave Mining – the state of the art. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 90 (10), pp. 279-293.
- Laubscher, D. 2006. Cave Mining Handbook. De Beers Group, South Africa, pp. 115-118.
- Pierce, C.S. 1884. The numerical measure of the success of predictions. Science, vol. 4, no. 93, pp. 453-454.
- Pierce, M. 2008. REBOP Version 3.1 For Block Caving User Guide. Itasca, Minneapolis.
- Pierce, ME. 2009. A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. PhD thesis, The University of Queensland, Brisbane.
- Pretorius, D., & Ngidi, S. 2008. Cave management ensuring optimal life of mine at Palabora. En MassMin 2008, pp. 63-71, Lulea, Sweden.
- Sánchez, V., Castro, R. L., & Palma, S. 2019. Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 114, p. 24-32.
- Sougarret, J., Quiñones, L., Morales, R., & Apablaza, R. 2004. New vision in caving mining in Codelco Chile, Andina Division. En Proceedings MassMin 2004. Santiago, Chile: Ediarte S.A., pp. 542-546.
- Susaeta, A. 2004. Theory of gravity flow (Part 1). En proceedings of MassMin 2004, ed: A. Karzulovic, M. Alfaro, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago de Chile, pp. 167-172.
- Susaeta, A. 2004. Theory of gravity flow (Part 2). En proceedings of MassMin 2004, ed: A. Karzulovic, M. Alfaro, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago de Chile, pp. 173-178.
- Valencia, M. (2014). Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, Universidad de Chile.
- Vergara, P. 2016. Estudio experimental de flujo gravitacional de minería de Caving. Memoria para optar al grado de ingeniero civil de Minas. Santiago, Chile: Universidad de Chile.