

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

**DESARROLLO DE FLOWSIM 3.0: SIMULADOR DE FLUJO GRAVITACIONAL  
PARA MINERÍA DE BLOCK/PANEL CAVING**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**RUBÉN ANDRÉS GONZÁLEZ ITURRIAGA**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
PABLO PAREDES MORALES  
CHRISTIÁN IHLE BASCUÑAN**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2014**

## RESUMEN

En minería de hundimiento, el movimiento del material fragmentado a lo largo de la columna de mineral, impacta directamente sobre la recuperación y dilución, afectando así el negocio minero. Con la intención de aumentar las tasas de recuperación de mineral y disminuir las tasas de dilución, se desarrollan simuladores que buscan predecir el comportamiento del flujo para servir como una herramienta complementaria para el diseño y la planificación de la mina.

En este contexto se presenta FlowSim 1.0, un simulador de flujo gravitacional basado en autómatas celulares y desarrollado en lenguaje Matlab. Debido a la lentitud en los procesos y a la poca capacidad en el manejo de datos, el algoritmo se transcribe a C++ (FlowSim 2.0), un lenguaje computacional más potente. El presente trabajo busca desarrollar FlowSim 3.0 con el objetivo de mejorar la capacidad de predicción del ingreso de dilución en puntos de extracción. Para lo anterior, se implementa un mecanismo llamado flujo preferencial y se propone un algoritmo para la predicción de colgaduras en bateas.

El mecanismo de flujo preferencial busca representar la tendencia del flujo gravitacional de privilegiar zonas de menor calidad. Por esto, también es posible representar la mayor capacidad de movimiento que poseen los fragmentos finos en la columna de mineral (migración de finos). La implementación del flujo preferencial considera la escritura del código, su indexación a FlowSim 3.0 y análisis de resultados de simulaciones.

Los resultados de las simulaciones permiten determinar que el mecanismo de flujo preferencial es implementado de manera exitosa, ya que se observa una mayor preferencia del flujo en privilegiar zonas de menor calidad. Además, la implementación del mecanismo en FlowSim 3.0 permite reproducir de manera consistente las hipótesis realizadas por Laubscher (1994) en el ingreso de dilución producto de la variación del espaciamiento entre puntos de extracción y del grado de heterogeneidad del material presente en la columna de mineral. Por último, se concluye que el mecanismo de flujo preferencial implementado tiene el potencial de representar de mejor forma el comportamiento del flujo gravitacional, ya que ayudaría a mejorar la capacidad de predicción del ingreso de dilución, sin embargo, es necesario un proceso de calibración y validación del simulador.

La propuesta para el algoritmo de predicción de colgaduras considera sólo la escritura y su indexación en FlowSim 1.0 para una posterior implementación real en su versión 3.0. El algoritmo es creado con la finalidad de conocer el número de eventos de colgadura que se pueden producir en un punto, al extraer una cantidad determinada de mineral. Este dato es muy valioso para las faenas mineras ya que tienen la posibilidad de mejorar la planificación minera, conocer el porcentaje de área disponible para la producción, determinar el impacto en el flujo gravitacional debido a la interrupción del tiraje programado, distribuir de mejor forma a las cuadrillas de descuelgue y enviarlas a zonas que presenten mayor cantidad de colgaduras, entre otras cosas. El algoritmo está basado en el uso de curvas estimativas de frecuencia de colgaduras construidas a partir de resultados experimentales de flujo confinado. La poca cantidad de curvas existentes produce una nula o poca variabilidad en los resultados simulados, por lo tanto es necesario replicar estos experimentos para la construcción de nuevas curvas y obtener resultados más representativos.

## ABSTRACT

In Block/Panel Caving, the movement of the fragmented material through the column of ore impacts directly in the percentage of recovery and dilution, thereby impacting the mining business. In order to improve recovery rates and reduce ore dilution rates, simulators that aim to predict the flow are developed to be used as a complementary tool for design and mining planning.

In this context, FlowSim 1.0 that is a gravity flow simulator based on cellular automata and developed in MATLAB is presented. Due to that simulation takes a long time and it has low capacity in the data manage, the algorithm was transcribe to C++, which is a computational language more effective (FlowSim 2.0). This study seeks to help in the development of FlowSim 3.0 in order to improve the prediction of entry dilution on the drawpoints. Thus, a new mechanism called preferential flow is implemented, and an algorithm for prediction of hang ups on the drawbell is proposed.

The mechanism of preferential flow tries to represent the tendency of gravity flow movement to zones with low rock mass rating. For this, is possible to represent the higher movement capacity that the fines fragments have in the ore column (fines migration). The implementation of this mechanism considers writing code, the module indexing in FlowSim 3.0 and analysis of simulation results.

The simulation results conclude that the algorithm is successfully implemented because a higher preference of the flow to privilege zones with low rock mass rating is observed. Also, the implementation of this mechanism in FlowSim 3.0 allow to reproduce the assumptions carried out by Laubscher (1994) in the entry dilution due to changes in the spacing between two adjacent drawpoints and changes in the degree of heterogeneity of rock mass presents in the ore column. Finally, it is concluded that the mechanism of preferential flow implemented have the potential to represent in the proper way the gravity flow behavior. This would help to improve the prediction capacity of entry dilution, however, it is necessary a calibration and validation process.

The proposed prediction hanging ups take into consideration only the writing code and the module indexing in FlowSim 1.0 to a future implementation in FlowSim 3.0. The algorithm is created in order to know the number of events that can occur in a drawpoint, when a certain amount of mineral is removed. This data is very valuable for mining operations as they have the potential to improve mine planning, knowing the percentage of area available for production, to determine the impact on gravitational flow due to the interruption of the scheduled extraction, distribute the crews works and send them to areas with hang ups. Finally, the algorithm is based on estimated curves for prediction of hang ups, which were constructed by experimental results from confined flow researches. Actually, it is necessary to carry out more confined flow experiments to get more estimated curves which allow to obtain results more representatives.

*Viejos, este logro  
es de ustedes.*

## AGRADECIMIENTOS

Termina este largo camino y quiero dedicar tiempo en agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma me acompañaron en este proceso.

En primer lugar, agradecer a mis padres por todo el apoyo y cariño incondicional que me han entregado durante toda mi vida. Todo lo que es esto, lo que soy y lo que tengo se los debo a ustedes. Eternamente agradecido.

A mis hermanos, Diego y Jennifer, por compartir y acompañarme en el día a día y por el apoyo y ánimo entregado. Y a toda mi familia, primos, tíos y abuelos.

Mi especial agradecimiento a Carolina, mi polola, por acompañarme en esta etapa, apoyándome en mis frustraciones y alegrías, siendo mi pilar fundamental y dándome todo su cariño cuando sentía que las cosas no estaban funcionando. Gracias.

Gracias a todos mis amigos que conocí en este mundo universitario. Saludos especiales a Chapa, Félix, Alfonso, Prócer, Daniela, Emilio, Valeria.

A cada uno de mis compañeros mineros, con los que compartí no solo una clase o un trabajo grupal, sino que también grandes momentos de conversación, fondas mineras, asambleas, asados, risas, etc. Agradezco en especial a Giovanni, Toño, David, Sewa, Yerko y Maria Elena.

A mis compañeros de BCTEC: Francisco, Álvaro y Rene por hacer más llevaderos los días agotadores de trabajo.

En general, a cada uno de las personas que conocí a lo largo de estos años de estudios en la U, cada uno aportó su pequeño grano de arena para hacer más entretenidos los días de estudios y trabajos.

Finalmente, agradezco a mi profesor guía Raúl Castro por confiar en mis capacidades para llevar a cabo este trabajo. De igual forma, agradezco a los miembros de mi comisión, Pablo Paredes y Christian Ihle, por su buena disposición y por el tiempo dedicado.

Gracias a todos por ser parte de esta experiencia...  
¡Beba, beba compañero! ¡Salud!

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación del trabajo.....	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.2.1.	Objetivo general.....	1
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Contenido por capítulo.....	3
2.	ANTECEDENTES.....	5
2.1.	Flujo gravitacional.....	5
2.2.	Modelos físicos.....	6
2.3.	Modelos numéricos.....	7
2.3.1.	Modelos dinámicos.....	7
2.3.2.	Modelos cinemáticos o autómatas celulares.....	7
2.4.	Simulador FlowSim.....	8
2.4.1.	Lógica y funcionamiento.....	9
2.4.2.	Inputs.....	12
2.4.3.	Evolución y aplicaciones de FlowSim.....	13
2.4.4.	Flujo preferencial: una mejora para FlowSim 2.0.....	14
2.5.	Metodología de diseño de Laubscher (1994, 2000).....	16
2.6.	Definición de punto de entrada de dilución (PED).....	18
2.7.	Caso estudio: Sector Inca Central Este (Mina El Salvador, Codelco).....	19
2.8.	Colgaduras.....	22
2.8.1.	Principales parámetros en la formación de colgaduras.....	24
2.8.2.	Esfuerzo vertical de una pila fragmentada.....	25
2.8.3.	Modelo de colgaduras.....	26
2.9.	Conclusiones del capítulo.....	27
3.	METODOLOGÍA.....	29
3.1.	ETAPA 1: Implementación del flujo preferencial.....	29
3.2.	ETAPA 2: Propuesta algoritmo de colgaduras.....	31
4.	IMPLEMENTACION DEL FLUJO PREFERENCIAL.....	32
4.1.	Algoritmo flujo preferencial.....	32
4.1.1.	Flujo preferencial y migración de finos.....	33
4.1.2.	Definición de nuevos estados: grueso y fino.....	34
4.2.	Análisis de sensibilidad.....	35

4.2.1.	Parámetro N (sin flujo preferencial).....	35
4.2.2.	Parámetro M (con flujo preferencial).....	36
4.2.3.	Restricción cV .....	39
4.3.	Casos hipotéticos .....	40
4.3.1.	Caso vertical .....	41
4.3.2.	Caso horizontal.....	42
4.4.	Simulaciones tiraje aislado .....	43
4.4.1.	Variando parámetro N .....	44
4.4.2.	Variando parámetro cV .....	46
4.4.3.	Variando parámetro M.....	48
4.5.	Comparación entre FlowSim 3.0 y metodología de Laubscher.....	50
4.5.1.	Definición tipo malla y simulación .....	50
4.5.2.	Resultados y análisis.....	51
4.6.	Simulaciones FlowSim 3.0 a nivel industrial .....	54
4.6.1.	Herramientas comparativas .....	54
4.6.1.	Resultados y análisis.....	55
4.7.	Conclusiones del capítulo .....	58
5.	PROPUESTA ALGORITMO COLGADURAS .....	61
5.1.	Estudio y definición de principales parámetros.....	61
5.1.1.	Razón entre la abertura mínima de batea y tamaño medio de fragmentos.....	62
5.1.2.	Sobrecarga de la pila fragmentada.....	63
5.2.	Elaboración algoritmo predicción de colgadas.....	63
5.3.	Caso hipotético .....	64
5.4.	Conclusiones del capítulo .....	66
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
6.1.	Conclusiones generales.....	67
6.2.	Recomendaciones .....	68
	BIBLIOGRAFÍA .....	71
	ANEXO A: Algoritmos de flowsim.....	73
A.1.	Antiguo código de cálculo de curva de probabilidad.....	73
A.2.	Código Flujo Preferencial (Nuevo cálculo de curva de probabilidad) .....	74
A.3.	Código Predicción de Colgadas.....	75
	ANEXO B: Resultados comparación FlowSim 3.0 con ICE .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen extracción sector Inca Central Este, Mina El Salvador. ....	19
Tabla 2: Resumen contenido de dilución en sector Inca Central Este, Mina El Salvador. ....	20
Tabla 3: Condición de flujo en sistemas de traspaso (Hustrulid and Sun, 2004). ....	24
Tabla 4: Parámetros del modelo de colgadura (Gómez, 2014) .....	27
Tabla 5: Rango permisible de valores para las constantes de ajustes. ....	40
Tabla 6: Efecto de las constates de ajustes en el resultado de la simulación. ....	49
Tabla 7: Variación del espaciamiento entre puntos. ....	51
Tabla 8: Resultados tiraje uniforme variando espaciamiento y parámetro M. ....	51
Tabla 9: Parámetros de cálculo de PED según metodología de Laubscher (1994). ....	52
Tabla 10: Cálculo del punto entrada de dilución según Laubscher (1994). ....	52
Tabla 11: Comparación entre PED Laubscher y PED simulaciones. ....	53
Tabla 12: Resumen de resultados de simulaciones para sector ICE. ....	56
Tabla 13: Comparación simulación de ICE en FlowSim 3.0 vs REBOP (Paredes, 2012). ....	58
Tabla 14: Definición de curvas de predicción de frecuencia de colgaduras .....	64
Tabla 15: Datos para caso hipotético de colgaduras .....	65
Tabla 16: Fragmentación versus elección de curva de predicción de frecuencia de colgaduras... ..	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relaciones geométricas elipsoides de movimiento y extracción, Kvapil (1992). .....	5
Figura 2: Representación de espacio y estado. ....	9
Figura 3: Esquema de celdas adyacentes al vacío en estudio (celdas vecinas o vecindad).....	10
Figura 4: Celdas vecinas en la cota superior. ....	11
Figura 5: Esquema general del algoritmo de ascenso de vacíos en FlowSim. ....	12
Figura 6: Parámetros geométricos utilizados en FlowSim (Castro, 2006). ....	13
Figura 7: Flujo preferencial hacia falla Oeste. Chuquicamata (Castro y Rubio, 2009). ....	15
Figura 8: Determinación de espaciamiento entre puntos de extracción (Laubscher,1994).....	17
Figura 9: Determinación de altura de interacción (Laubscher, 1994). ....	17
Figura 10: Toneladas de mineral y leyes de Cu extraídas por periodo en ICE. ....	19
Figura 11: A) Alturas de columna in-situ en ICE – B) Secuencia de extracción en ICE (Paredes, 2012).....	20
Figura 12: Toneladas y contenido de dilución extraídos por período en ICE. ....	21
Figura 13: Punto entrada de dilución al 3% (PED(3%)) en ICE (vista planta). ....	21
Figura 14: Distribución de esfuerzos en los puntos de contacto entre fragmentos (Craig, 2004). ....	22
Figura 15: Formación de arcos presentes en minería de hundimiento (Troncoso, 2006). ....	23
Figura 16: Diámetro de abertura vs tamaño máximo de partícula (Cornejo, 2008). ....	24
Figura 17: Condición de flujo considerando carga vertical (Fuenzalida, 2012). ....	25
Figura 18: Modelo de curvas de estimación de frecuencia de colgaduras (Gómez, 2014). ....	27
Figura 19: Diagrama de flujo de la metodología del presente trabajo.....	29
Figura 20: Esquema general del algoritmo de ascenso de vacío considerando flujo preferencial. ....	32
Figura 21: Representación migración de finos (Armijo et al., 2014).....	33
Figura 22: Nuevos estados en FlowSim con la implementación del flujo preferencial. ....	34
Figura 23: Probabilidad de selección de bloque según el valor del parámetro N. ....	36
Figura 24: Configuración de bloques para análisis de sensibilidad del parámetro M. ....	37
Figura 25: Probabilidad de selección de bloque según el valor del parámetro N y M. ....	38
Figura 26: Probabilidad de los bloques según valor de RMR para finos y gruesos y valor de parámetro M. ....	39
Figura 27: Vecindad de celdas.....	39
Figura 28: Casos hipotéticos (Vista lateral) a) Caso Vertical – b) Caso Horizontal.....	40
Figura 29: Simulación en FlowSim sin y con flujo preferencial (Caso Vertical). ....	41
Figura 30: Dilución acumulada con y sin mecanismo de flujo preferencial para el Caso Vertical. ....	42
Figura 31: Simulación en FlowSim sin y con flujo preferencial (Caso Horizontal). ....	43
Figura 32: Dilución acumulada con y sin mecanismo de flujo preferencial para el Caso Horizontal. ....	43
Figura 33: Resultados de dilución acumulada para variaciones del parámetro N.....	44
Figura 34: Dimensiones de elipsoide de extracción para simulaciones variando N. ....	45
Figura 35: Elipsoide de extracción para simulaciones variando N (10% de extracción; $cV = 4$ ). ....	46
Figura 36: Resultados de dilución acumulada para simulaciones variando $cV$ . ....	47

Figura 37: Dimensiones de elipsoide de extracción para simulaciones variando cV.....	47
Figura 38: Elipsoide de extracción para simulaciones variando cV (10% de extracción; N=3,4).	48
Figura 39: Resultados de dilución acumulada variando M (10% de extracción).....	48
Figura 40: Representación malla regular tipo Teniente.....	50
Figura 41: Modelo de estimación de frecuencias de colgaduras (curvas hipotéticas).....	61
Figura 42: Representación de abertura mínima de batea (D) y tamaño medio de las celdas ( $d_m$ ).	62
Figura 43: Esquema general del algoritmo de predicción de colgaduras. ....	63
Figura 44: Representación plano a la altura de la visera de la batea en caso hipotético. ....	64
Figura 45: Tonelajes extraídos y simulados en sector ICE. ....	77
Figura 46: Leyes de Cu extraídos y simulados en ICE.....	77
Figura 47: Dilución acumulada extraídos y simulados en ICE. ....	78
Figura 48: Contenido de dilución extraída y simulada en ICE.....	78
Figura 49: Vista en planta PED (3%) datos mina y PED (3%) simulado por FlowSim 3.0. ....	79

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación del trabajo

El desarrollo de nuevos proyectos asociados a minería de hundimiento, como Chuquicamata Subterránea o Nuevo Nivel Mina de División El Teniente, han incentivado una mayor atención a estudios que buscan entender el comportamiento del flujo gravitacional. La manera en que se comporta el flujo impacta directamente sobre la recuperación y la dilución que se obtienen en minas de Block/Panel caving.

Con la intención de mejorar las tasas de recuperación de mineral y disminuir las tasas de dilución, se desarrollan simuladores que buscan predecir el comportamiento del flujo gravitacional y de esta forma servir como una herramienta complementaria para el desarrollo del diseño y la planificación de la mina. Cada simulador se basa en sus propias teorías de movimiento y reglas que son resultados de diversos estudios. En este contexto se presenta FlowSim 1.0, un simulador de flujo gravitacional creado por Castro (2006), el cual se encuentra escrito en lenguaje Matlab y está basado en autómatas celulares. El simulador propone un modelo de reglas simples para generar la representación del flujo gravitacional y, debido a la simplicidad de los cálculos, la principal ventaja de esta herramienta frente a sus similares son tiempos de respuestas más rápidas y eficaces. Para otorgar mayor capacidad de procesamiento, el algoritmo de FlowSim 1.0 fue transcrito a lenguaje C++, teniendo como resultado FlowSim 2.0.

Este avance permite implementar nuevos mecanismos y variables con el fin de representar de mejor manera el comportamiento del flujo gravitacional. Por lo anterior, Valencia (2014), basada en observaciones teóricas y experimentales sobre la heterogeneidad geotécnica del macizo rocoso, elabora un nuevo mecanismo para FlowSim 2.0. Este mecanismo, llamado flujo preferencial, otorga mayor capacidad de movimiento a fragmentos de menor calidad (menor RMR) y la implementación se realiza en un prototipo de FlowSim 2D en lenguaje Matlab.

El presente trabajo busca avanzar en el desarrollo del simulador FlowSim hacia una versión 3.0. El objetivo es mejorar la capacidad de predicción del ingreso de dilución a través de la implementación del flujo preferencial en 3D y la elaboración de nuevas propuestas. De esta manera en el futuro este simulador pueda salir al mercado a competir con sus pares y servir como herramienta para el desarrollo del diseño y planificación minera.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. *Objetivo general*

El objetivo general del presente trabajo es avanzar en el desarrollo de FlowSim hacia una versión 3.0, de manera que sirva como una herramienta para el diseño y la planificación en minas de block y panel caving. Se propone mejorar la capacidad de predicción del ingreso de dilución,

planteando nuevos mecanismos que permitan simular el comportamiento de la roca hundida en el flujo gravitacional.

### *1.2.2. Objetivos específicos*

Con el fin de cumplir los objetivos generales del presente trabajo, se definen las siguientes etapas:

- Implementar el mecanismo de flujo preferencial propuesto por Valencia (2014) en FlowSim 1.0 como prototipo de pruebas y de manera definitiva en FlowSim 3.0 (en tres dimensiones).
- Realizar un análisis de sensibilidad de las constantes de ajustes de FlowSim 1.0 (que incluye mecanismo de flujo preferencial), de esta manera verificar una correcta implementación y funcionamiento del mecanismo implementado.
- Verificar la correcta implementación y funcionamiento del mecanismo de flujo preferencial en FlowSim 3.0 mediante el análisis de los resultados de las simulaciones.
- Realizar simulaciones a escala mina para analizar el funcionamiento del mecanismo de flujo preferencial en FlowSim 3.0 con volúmenes de datos reales en la industria.
- Realizar una propuesta de algoritmo para que FlowSim pueda predecir colgaduras en bateas.
- Realizar la escritura del código de dicho algoritmo, el cual se implementa en FlowSim 1.0 (lenguaje Matlab) como prototipo.
- Definir, de acuerdo a los resultados obtenidos, futuros trabajos a realizar y/o recomendaciones.

### **1.3. Alcances**

- La implementación del flujo preferencial en FlowSim 1.0 es realizada por el autor del presente trabajo, mientras que la implementación de este mecanismo en FlowSim 3.0 es realizada por un experto en computación con el apoyo del mismo autor.
- El estudio abarca el proceso de análisis de resultados de simulaciones y sensibilidad de variables posterior a la implementación del flujo preferencial.
- La versión 3.0 de FlowSim corresponde a FlowSim 2.0 con el mecanismo de flujo preferencial implementado.
- La simulación a escala mina de FlowSim 3.0 se realiza utilizando los datos obtenidos del sector Inca Central Este de la Mina El Salvador. Cabe destacar que no es una etapa de calibración, sólo se desea probar que el simulador funciona de manera correcta con un volumen de datos real a nivel industrial.
- El algoritmo de predicción de colgaduras es sólo una propuesta para una posterior implementación real en FlowSim 3.0. Por lo tanto la escritura del código se realiza para FlowSim 1.0 (lenguaje Matlab) como un mecanismo prototipo para estudios preliminares.

- La propuesta de predicción de colgaduras considera sólo el efecto de la carga vertical que genera la columna de mineral fragmentada y la razón entre la abertura mínima de la batea vs el diámetro medio de los fragmentos. Por lo tanto, cualquier otro efecto no es considerado.

#### 1.4. Contenido por capítulo

- **Capítulo 1: Introducción.** Presentación de la motivación del trabajo, objetivos y alcances.
- **Capítulo 2: Antecedentes.** Revisión de algunos conceptos fundamentales del flujo gravitacional como también de modelación numérica y física del mismo flujo. Análisis de FlowSim y la evolución en su desarrollo como un simulador de flujo gravitacional. Además, se presenta el flujo preferencial como un nuevo mecanismo para el simulador. Revisión de la metodología de Laubscher, definición de punto entrada de dilución y presentación del caso estudio sector Inca Central Este de la Mina El Salvador de Codelco. Revisión bibliográfica sobre conceptos fundamentales de colgaduras en puntos de extracción. Conclusión sobre la necesidad de avanzar hacia FlowSim 3.0 como una nueva versión del simulador que contenga las mejoras estudiadas en el presente capítulo.
- **Capítulo 3: Metodología.** Formulación de la metodología de trabajo.
- **Capítulo 4: Implementación Flujo Preferencial.** A partir de la evidencia presentada en el Capítulo 2 se plantea e implementa el flujo preferencial como nuevo mecanismo para FlowSim 3.0. Se implementa también en FlowSim 1.0 (lenguaje Matlab) como prototipo para realizar pruebas. Se asocia el proceso de migración de finos con el mecanismo de flujo preferencial y para simplificar la implementación, se define el grueso y fino como nuevos estados para FlowSim. Luego, se realiza un análisis de sensibilidad de las constantes de ajustes para un mayor entendimiento de los efectos que poseen estas constantes en los resultados de las simulaciones. Posteriormente, se estudian dos casos hipotéticos con la intención de revisar la buena implementación del flujo preferencial en FlowSim 1.0 y también, se realizan simulaciones de tiraje aislado en FlowSim 1.0 variando las constantes de ajustes para estudiar el efecto de estas variaciones en los resultados. Además, se llevan a cabo simulaciones de tiraje uniforme en FlowSim 3.0 variando el espaciamiento entre los puntos y el parámetro M con el fin de estudiar los resultados y analizar los efectos de estas variaciones, estos resultados también son comparados con las observaciones realizadas por Laubscher y que son incluidas en su metodología. Finalmente, se realizan simulaciones en FlowSim 3.0 con el caso de estudio determinado (Inca Central Este) con el fin de analizar el funcionamiento del flujo preferencial con volúmenes de datos real a nivel industrial.
- **Capítulo 5: Propuesta Algoritmo Predicción de Colgaduras.** Elaboración y propuesta de un algoritmo de predicción de colgaduras para una futura implementación en el simulador

FlowSim 3.0. Definición de las principales variables que afectan la aparición de estos eventos. Escritura del código de colgaduras para FlowSim 1.0 como prototipo para realizar pruebas.

- **Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.** Conclusiones finales del trabajo y recomendaciones relacionadas al futuro desarrollo de FlowSim 3.0 como simulador de flujo gravitacional.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Flujo gravitacional

Para entender la lógica de los simuladores de flujo para minas de Block/Panel Caving, es necesario entender las teorías que existen en torno al flujo gravitacional.

El flujo gravitacional es el concepto del movimiento de un grupo de partículas que interactúan entre sí, y cuyas trayectorias son gobernadas tanto por la gravedad como por las fuerzas causadas por su interacción (Castro, 2006). La forma de este movimiento impacta tanto en la recuperación del mineral, como en la entrada de dilución de las minas que extraen el mineral a través de métodos de hundimiento.

Kvapil (1965) investiga el comportamiento del flujo gravitacional utilizando modelos físicos a escala de laboratorio. Utilizando arena en los experimentos como material de flujo, Kvapil observa evidencia de dos zonas espaciales claramente definidas. La primera zona, llamada “Elipsoide de Extracción”, corresponde al volumen definido por la ubicación original de todos los puntos que han sido extraídos. La segunda zona, llamada “Elipsoide de Movimiento”, corresponde al volumen definido por la ubicación original de todos los puntos que han cambiado de posición por resultado de la extracción y reacomodamiento de estos. Esta zona marca el límite entre los puntos en movimiento y aquellos puntos en la que su ubicación ha permanecido invariable en el tiempo desde que comenzó la extracción. Kvapil introduce estos dos importantes conceptos que se utilizan hasta el día de hoy en la teoría del flujo gravitacional.

Tiempo más tarde, Kvapil (1992) establece relaciones geométricas entre ambas zonas. Como se observa en la Figura 1, se determina que la relación de altura entre el elipsoide de extracción y movimiento es 1:2,5 y la relación entre volúmenes es 1:15 (Figura 1).

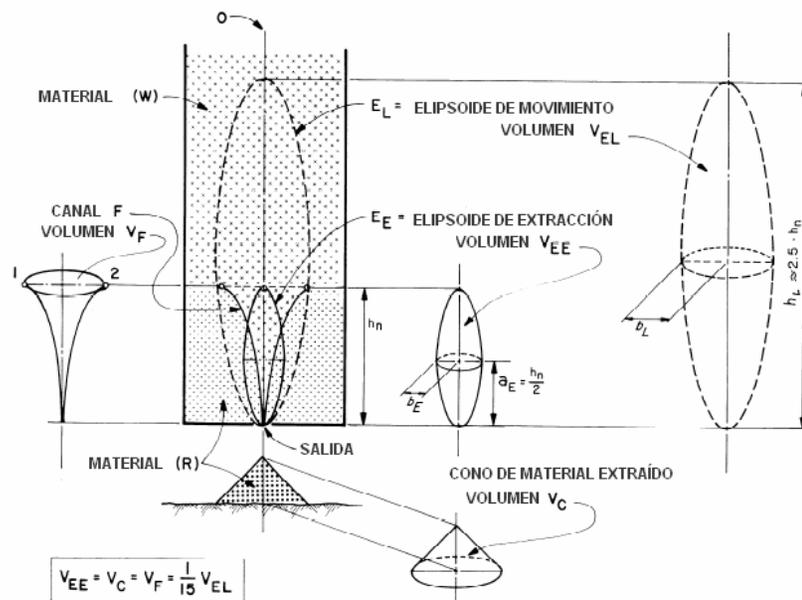


Figura 1: Relaciones geométricas elipsoides de movimiento y extracción, Kvapil (1992).

Cabe destacar que el flujo gravitacional de material fragmentado en minería de hundimiento ha sido estudiado desde hace mucho tiempo, sin embargo, aún no es entendido completamente y existe mucha incertidumbre sobre su comportamiento. La propuesta de modelos buscan representar el movimiento del material fragmentado a través de modelos físicos y/o matemáticos (Valencia, 2014).

## **2.2. Modelos físicos**

Un modelo físico se define como la representación a escala de fenómenos físicos con el fin de observar y entender las leyes físicas que lo rigen. El uso de estos modelos está basado en que la física puede ser descrita con las leyes fundamentales de la mecánica (Fernandez, 2009). Por esta razón, la calibración de FlowSim y del nuevo mecanismo es posible ser realizada utilizando resultados experimentales de un modelo a escala.

Además de servir como medio de calibración para simuladores, los resultados que se obtienen a través de modelos físicos ayudan a fortalecer el estudio del flujo gravitacional y formular nuevas teorías. Algunos importantes resultados son descritos a continuación:

- Kvpil (1965): Kvpil utilizó arena como material granular en un modelo 2D en donde se definió por primera vez las elipsoides de movimiento y extracción (IMZ e IEZ, respectivamente). A pesar de ser un modelo 2D, fue de gran importancia ya que establecieron las primeras reglas y bases para el diseño de flujos.
- Laubscher (1994): Desarrolló un modelo físico en 3D con el objetivo de observar y estudiar la interacción entre puntos de extracción adyacentes. Con los resultados obtenidos, Laubscher formuló la Teoría de Tiraje Interactivo en donde la extracción de múltiples puntos provoca movimientos laterales y verticales, colapsando los vacíos existentes e impidiendo la percolación de finos desde los niveles superiores.
- Power (2004): Varios estudios se orientaron a la revisión de las escalas de los modelos físicos. La principal conclusión fue que la escala mínima para lograr resultados aceptables es 1:30 en modelos físicos.
- Susaeta (2004): Utilizó un modelo de arena para medir las velocidades del flujo gravitacional para tiraje aislado y para tiraje interactivo. Los resultados experimentales ayudaron a concluir que mientras más uniforme es el tiraje, la entrada de dilución es más tardía (Índice de Uniformidad).
- Castro y Whiten (2007): En un modelo físico de 3 dimensiones se utilizó gravilla en vez de arena. La evidencia experimental reveló que las zonas de movimiento aislado crecen indefinidamente a medida que se extrae desde el punto. Por otro lado la altura de columna y la masa extraída son las principales influencias sobre la zona de extracción en flujo aislado.

## 2.3. Modelos numéricos

Un modelo numérico es más bien un modelo matemático que busca predecir a través de reglas, ecuaciones, teorías o leyes, el comportamiento de algún fenómeno cuyo resultado se desea conocer. Los modelos numéricos se pueden clasificar en modelos dinámicos o modelos cinemáticos según sea la base teórica utilizada.

### 2.3.1. Modelos dinámicos

Simulan el flujo gravitacional de acuerdo a las leyes físicas de la mecánica, es decir, el movimiento se describe mediante el desarrollo de ecuaciones de balance de fuerzas entre partículas. La importancia de este tipo de simulaciones es fundamental para obtener aproximaciones del flujo gravitacional, pero para validaciones a escala mina no son prácticas, debido al aumento en el número de partículas a simular y a la limitada capacidad de procesamiento de las computadoras actuales.

PFC3D (Particle Flow in three dimensions), desarrollado por Itasca, es un modelo de este tipo. Se basa en partículas en movimiento que interactúan bajo las leyes de movimiento y el contacto entre partículas. Se utiliza principalmente para estudiar el flujo de las partículas en puntos de extracción, pero es de utilidad limitada debido a los largos tiempos de simulación requeridos.

### 2.3.2. Modelos cinemáticos o autómatas celulares

#### 2.3.2.1. Conceptos básicos

Un autómata celular corresponde a un modelo matemático que simula un sistema de elementos, el cual evoluciona a pasos discretos. Básicamente un autómata celular consiste en un arreglo regular de celdas del mismo tipo, que tienen un conjunto finito y discreto de estados posibles. Estos estados se actualizan de manera discreta en el tiempo, de acuerdo a las reglas que dependen exclusivamente del estado de la vecindad de las celdas (Castro, 2006).

Las características que definen un autómata celular son:

- **Espacio:** Se representa como una rejilla o cubo cuadrículado finitamente extendido, que depende de la dimensión del modelo. Cada cubículo de la rejilla es una célula que representa un espacio.
- **Estado:** Cada célula puede tomar un valor que representa el estado de una propiedad, característica o parámetro cualquiera.
- **Vecindad:** Conjunto de células con las cuales una determinada célula interactúa.
- **Función de transición:** Toma como argumentos los valores (estado) de la célula en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendrá en la siguiente etapa de tiempo. Este concepto también es llamado regla de evolución del autómata.

### 2.3.2.2. Aplicaciones de autómatas celulares en flujo gravitacional

Jolley (1968) posee una de las primeras publicaciones que relaciona el flujo gravitacional con la aplicación de los autómatas celulares. En esta investigación se simuló el flujo de material con el fin de determinar el espaciamiento óptimo entre puntos de extracción y políticas óptimas de tiraje para maximizar la recuperación de un pilar minero. Dentro de las simplificaciones del modelo, se definió que los estados posibles para las celdas eran mineral o estéril, además el flujo se simuló mediante la propagación de un solo vacío a la vez, el cual se propagaba hasta el final de la columna al extraerse una celda de material, contrario a lo observado experimentalmente.

La aplicación de autómatas celulares en flujo gravitacional no se limita a la minería, Baxter y Behringer (1991) aplicaron un modelo de flujo con reglas bien definidas en computadores de uso común para simular el flujo de partículas en silos con semillas. El modelo consideró la minimización de la energía potencial del sistema de partículas, la interacción por fricción, la orientación y la separación de partículas. Las validaciones se realizaron en base a los flujos de semillas y estas fueron meramente cualitativas. Este modelo muestra la posibilidad de incluir el fenómeno físico en la modelación del flujo y que la complejidad del autómata dependerá de las implementaciones realizadas.

### 2.3.2.3. Ventajas y desventajas de autómatas celulares

Una ventaja de los autómatas celulares son las reglas simples en que las que se basa el movimiento de las partículas y por lo tanto las simulaciones poseen una mayor rapidez. Recordar que es un sistema que evoluciona a pasos discretos y no es necesario recurrir a la resolución de ecuaciones diferenciales como ocurre en los modelos dinámicos.

Una desventaja es que deja de lado las reglas naturales por las que se rige el movimiento del flujo gravitacional.

## 2.4. Simulador FlowSim

Una de las últimas implementaciones de autómatas celulares fue propuesta por Castro y Whiten (2007). Los autores destacan el potencial de emplear autómatas celulares para modelar flujo, debido a la posibilidad de ser implementado en computadores de uso común y permitir obtener tiempos de simulación menores en comparación a modelos numéricos complejos (simuladores dinámicos).

Por lo anterior, Castro y Whiten (2007) plantean FlowSim 1.0 con el objeto de reproducir los patrones de flujo observados en los experimentos realizados por Castro (2006). Es importante destacar que el objetivo del simulador no es predecir el movimiento del flujo a nivel de partícula, sino que reproducir los efectos a nivel macroscópico y servir como una herramienta de planificación y diseño. FlowSim 1.0 se encuentra implementado en Matlab y parcialmente calibrado y validado para grupos reducidos de puntos de extracción (Castro et al., 2009).

### 2.4.1. Lógica y funcionamiento

FlowSim 1.0 es un simulador de flujo gravitacional, el cual se basa en un sistema autómatas celular y por lo tanto, posee las siguientes características:

- Espacio
- Estado
- Vecindad
- Función de Transición

El simulador considera al macizo rocoso como una discretización regular de bloques. La discretización está relacionada con las dimensiones de los puntos de extracción, donde la dimensión de los bloques deben ser igual o menor al ancho del punto. Cada bloque discretizado se le llama celda o célula y representa un “espacio” único. Cada célula puede poseer tres posibles “estados” (Figura 2):

- Granular:** Celdas que representan el material fragmentado (mineral, dilución, etc) y poseen la capacidad de movilidad (cambiar de posición) a lo largo de la simulación.
- Vacío:** Cada vez que se extrae un bloque granular en el punto de extracción, se reemplaza por un vacío. El principal algoritmo de movimiento en FlowSim es generado por el ascenso de vacíos.
- Sólido:** Celdas que representan las paredes, pilares, etc, es decir son aquellos bloques que no poseen la capacidad de movilidad (cambiar de posición). Permanecen durante toda la simulación en su posición original.

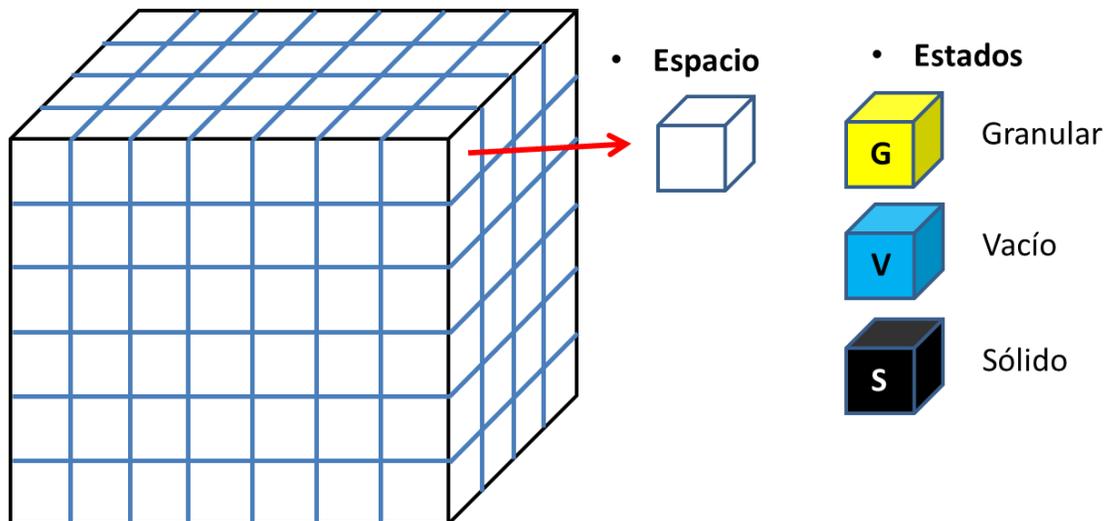


Figura 2: Representación de espacio y estado.

La base del movimiento de flujo en FlowSim 1.0 es el movimiento ascendente de vacíos. Cada vez que se realiza una extracción en el punto de extracción se genera un vacío, y desde este punto

el vacío comienza a ascender intercambiando posición con alguna celda granular en el nivel superior. Por lo tanto, el descenso de las celdas granulares se debe exclusivamente al ascenso de vacíos.

FlowSim 1.0 analiza uno por uno los vacíos presentes en la simulación. La condición para que un vacío ascienda al nivel superior, y que por lo tanto un granular descienda, se debe exclusivamente al estado que presentan las celdas vecinas del vacío en estudio. La Figura 3 muestra la vecindad para un vacío en estudio, las celdas vecinas son aquellas que se encuentran adyacentes al vacío en la misma cota (nivel K) y en la cota superior (nivel K+1).

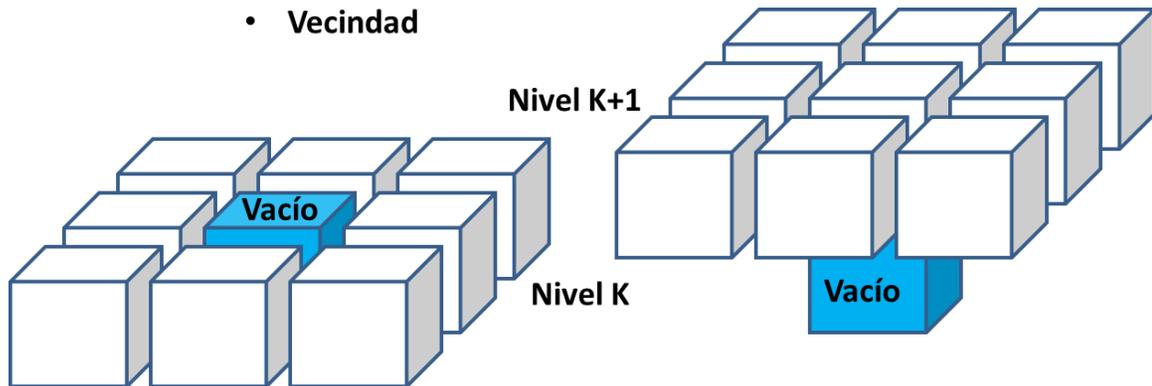


Figura 3: Esquema de celdas adyacentes al vacío en estudio (celdas vecinas o vecindad).

El vacío en estudio asciende sólo cuando la vecindad cumple la siguiente condición:

$$N_{VACIOS} \geq cV$$

Ecuación 1: Condición de ascenso de vacíos.

Donde  $N_{VACIOS}$  es el número de vacíos presentes en la vecindad y  $cV$  es la restricción mínima de vacíos.

Esto significa que si el número de vacíos presentes en la vecindad es mayor o igual que la restricción  $cV$ , el vacío sube a la cota superior. Por otro lado, si la restricción no se cumple, el vacío permanece en la misma posición y el simulador analizará el siguiente vacío. La restricción  $cV$  es un valor independiente que puede ser manipulado para obtener distintos resultados. Al calibrar FlowSim,  $cV$  es uno de los parámetros a variar para encontrar la mejor solución, por esta razón  $cV$  es considerada una constante de ajuste.

El vacío en estudio, al cumplir la condición de ascenso, debe intercambiar posición con alguna celda vecina ubicada en la cota superior. La decisión de cuál posición tomar está dada por la función de transición. Esta función es una curva de probabilidad que depende del inverso a la distancia existente entre el vacío y la supuesta nueva posición a ocupar en la cota superior. Por lo tanto mientras menor distancia exista entre el vacío y la celda “i”, hay una mayor probabilidad de que el vacío intercambie posición con aquella celda granular.

Las celdas vecinas ubicadas en la cota superior son nueve y éstas se dividen en una celda central (c), cuatro celdas laterales (l) y cuatro celdas esquinas (e) (Figura 4).

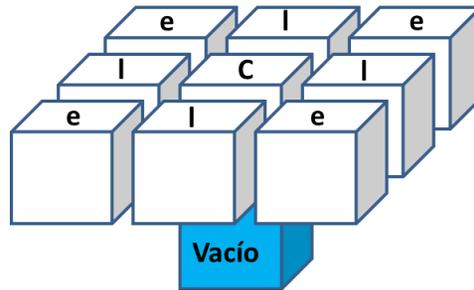


Figura 4: Celdas vecinas en la cota superior.

La celda central es la más cercana al vacío, luego la celda lateral y finalmente la celda esquina es la más lejana. Por lo tanto la mayor probabilidad de intercambiar posición con el vacío en estudio la posee la celda central, luego la celda lateral y posteriormente la celda esquina. Por último, la probabilidad de cada una de las celdas laterales son equivalentes ya que poseen la misma distancia, lo mismo ocurre con las cuatro celdas laterales.

La función que define la probabilidad de que el vacío intercambie posición con una celda granular “i” de la cota superior es la siguiente.

$$p_i = \frac{d_i^{-N}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-N}}$$

Ecuación 2: Curva de Probabilidad.

Donde  $p_i$  es la probabilidad de la celda “i”,  $d_i$  es la distancia entre el vacío y la celda “i” y N es una constante.

La curva de probabilidad no sólo depende de la distancia, depende también de N, un parámetro independiente. La variable N se encuentra como exponente negativo sobre la distancia, por lo que según el valor de N, la importancia de la distancia en la ecuación es mayor o menor. Es decir, según el valor de este parámetro, las probabilidades de las celdas cambian.

Al igual que cV, el valor de N puede ser manipulado para obtener distintos resultados. Por lo que al calibrar FlowSim, N es otro de los parámetros a variar para encontrar la mejor solución y de esta manera N es considerada una constante de ajuste.

A continuación, la Figura 5 representa el esquema del algoritmo principal con el cuál los vacíos ascienden en FlowSim 1.0. Se puede notar que el cálculo de la curva de probabilidad se realiza sólo una vez en la simulación, debido a que las distancias permanecen constantes entre las celdas y por lo tanto la curva de probabilidad no cambia.

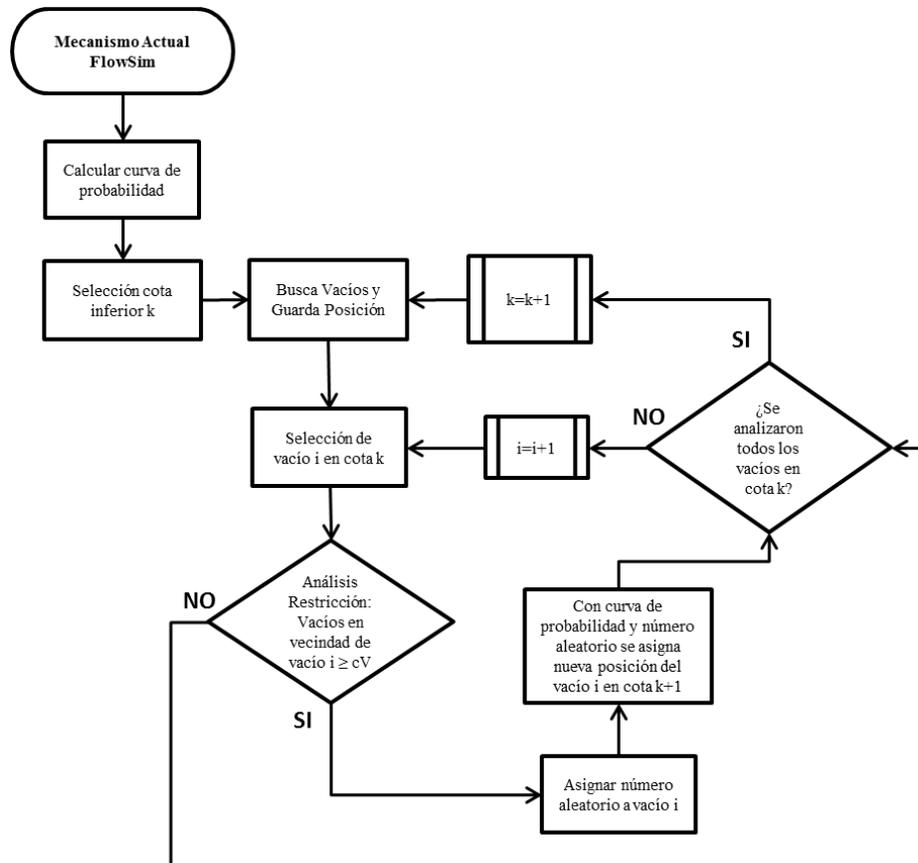


Figura 5: Esquema general del algoritmo de ascenso de vacíos en FlowSim.

#### 2.4.2. Inputs

Un input de importancia es la disposición del mineral a extraer para la construcción virtual de la zona, generalmente se refiere a un modelo de bloques que contiene información como leyes de mineral, densidad, tipo de roca, etc. La discretización se refiere al tamaño de bloques que serán utilizados para simular, estos bloques poseen la información proveniente del modelo de bloques. Mientras más pequeños sean estos bloques la construcción de la maqueta virtual y sus estructuras (bateas, pilares, etc) serán más exactas, debido al efecto de pixelación. Sin embargo, bloques más pequeños implican mayor tiempo de simulación debido al aumento en el número de procesos por la existencia de una mayor cantidad de bloques para representar una misma dimensión.

Otro input importante es la cantidad de tonelaje que se extrae en cada punto de extracción (carta histórica de extracción por punto y por período).

La posición de los puntos de extracción y sus dimensiones también son necesarios. La Figura 6 indica las dimensiones requeridas de los puntos: alto de la batea ( $db_h$ ), alto de galería de producción ( $dp_h$ ), ancho de galería de producción ( $dp_w$ ), largo de la batea ( $l$ ), ángulo del pilar menor ( $\alpha$ ) y el ángulo del pilar mayor ( $\beta$ ).

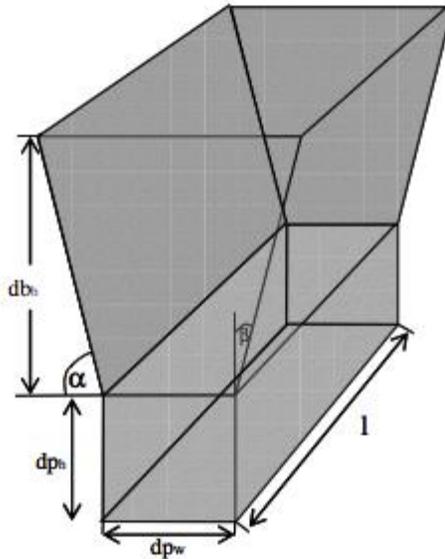


Figura 6: Parámetros geométricos utilizados en FlowSim (Castro, 2006).

Finalmente, las constantes de ajustes  $N$  y  $cV$  son considerados input de la simulación. El valor debe ser escogido por el usuario luego de su correspondiente calibración para obtener resultados aproximados.

#### 2.4.3. Evolución y aplicaciones de FlowSim

A continuación, se presenta la evolución que ha tenido el simulador FlowSim en estos años de desarrollo, como también estudios e investigaciones en los que se ha utilizado.

Como se explicó anteriormente, FlowSim 1.0 es desarrollado con el objetivo de reproducir los patrones de flujo observados en los experimentos realizados por Castro (2006) y fue implementado inicialmente en lenguaje Matlab. Castro (2006) calibra FlowSim 1.0 utilizando dos de sus experimentos de tiraje aislado, uno con distribución granulométrica más amplia ( $d_{50}=18\text{mm}$ ) y otro con distribución granulométrica más angosta ( $d_{50}=8\text{mm}$ ). Para realizar la calibración, el autor analiza las dimensiones geométricas del elipsoide de extracción y movimiento obtenidas en cada una de las simulaciones y de los experimentos. Castro (2006) concluye que cuando las constantes de ajustes  $N$  y  $cV$  poseen un valor de 3,4 y 4 respectivamente, FlowSim 1.0 es capaz de modelar la geometría de las elipsoides observadas en los modelos físicos de tiraje aislado a medida que varía la masa extraída. Por otro lado, en términos de extracción de múltiples puntos, el autor concluye que el simulador es capaz de representar el solapamiento de las zonas de movimiento como también las alturas de estas zonas.

Además, FlowSim 1.0 es utilizado por González (2008) para construir una metodología para el diseño de mallas de extracción en minería de hundimiento. Para lo anterior, González (2008) realiza diversas simulaciones de tiraje uniforme para analizar el punto de entrada de dilución (PED) al variar el espaciamiento entre puntos y la altura de columna de extracción.

Años más tarde, Castro (2009) luego de calibrar el simulador usando resultados de modelos físicos, condujo un estudio para comparar los datos medidos en operaciones con los resultados obtenidos de las simulaciones de FlowSim 1.0. El análisis se llevó a cabo utilizando datos del sector Inca Norte (Mina el Salvador, Codelco) y del sector Esmeralda (División El Teniente, Codelco), ambas operadas por el método de panel caving. Para realizar esta validación del simulador en Inca Norte, se seleccionaron cuatro grupos de puntos (clusters) en diferentes ubicaciones del sector y luego para la comparación de resultados se utiliza el PED de cada uno de los puntos pertenecientes a estos clusters. El estudio finaliza con la conclusión de que al utilizar el valor de las constantes de ajustes correctas, se obtienen buenas correlaciones entre datos medidos y simulados, por lo que Castro (2009) recomienda el uso de FlowSim para el diseño y la planificación de minería caving. Sin embargo, también concluye que el código en que se encuentra escrito FlowSim 1.0 no tiene la capacidad de simular casos más extensos, es decir, simular una mayor cantidad de puntos de extracción con una mayor cantidad de datos.

Debido a la lentitud de simulación y a la poca capacidad de datos que posee FlowSim 1.0, Miranda (2012) transcribe el algoritmo del simulador a lenguaje C++, un lenguaje computacional con mucha más capacidad y potencia, teniendo como resultado FlowSim 2.0. Esta nueva versión, permite un aumento considerable en la capacidad de datos y en la rapidez de ejecución y simulación, permitiendo simular minas completas de block/panel caving a lo largo de toda su vida de extracción.

Este avance da pie a la posibilidad de desarrollar e incorporar nuevos mecanismos en FlowSim con el fin de mejorar la capacidad de predicción y representatividad del flujo gravitacional. De esta forma, Valencia (2014) propone tres mecanismos para una futura incorporación en FlowSim 2.0, estos son Rilling, Cave Back y Flujo Preferencial. El autor desarrolla un prototipo de "FlowSim 2D" en lenguaje Matlab para implementar estos mecanismos. Por otro lado, replicando las calibraciones realizadas por Castro (2006) para tiraje aislado, Valencia (2014) obtiene los mismos valores para N y cV utilizando FlowSim 2.0, por lo que verifica la correcta transcripción de código desde FlowSim 1.0. Además, calibra FlowSim 2.0 para el caso de tiraje múltiple con un cluster del sector de Inca Norte (Mina el Salvador, Codelco) en donde obtiene que el valor de N y cV con los cuáles existe una mayor representatividad de los resultados es 4,9 y 3 respectivamente.

#### *2.4.4. Flujo preferencial: una mejora para FlowSim 2.0*

Cabe recordar que FlowSim es un simulador que aún se encuentra en desarrollo, por lo tanto se encuentra en constante revisión, ya sea modificando los mecanismos existentes o agregando nuevos. Estos mecanismos sirven para tener resultados mucho más aproximados al intentar representar las características que posee el flujo gravitacional.

Evidencia experimental (Figura 7) permitió sostener la suposición que la propagación del hundimiento en Chuquicamata subterránea se podría dirigir hacia el Oeste producto de la falla presente en el rajo (Falla Oeste), (Castro y Rubio, 2009).

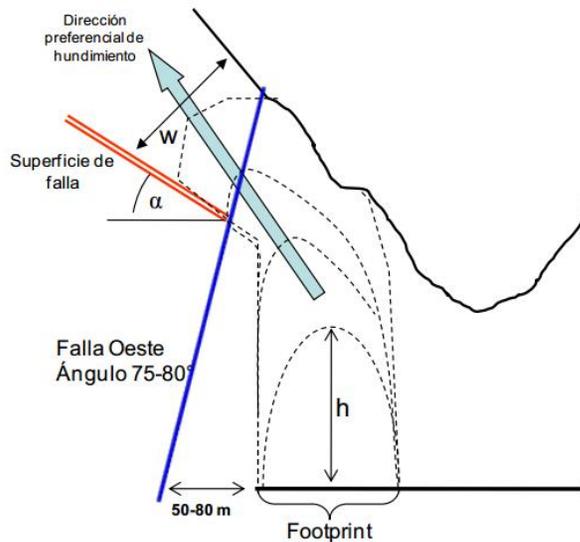


Figura 7: Flujo preferencial hacia falla Oeste. Chuquicamata (Castro y Rubio, 2009).

Valencia (2014), al estudiar esta particularidad del flujo, se realizó la siguiente interrogante ¿por qué el flujo tiende a la falla? Uno de los factores que cambia a medida que disminuye la distancia a la estructura es el índice RMR. Por lo tanto, Valencia formuló la siguiente hipótesis: “El flujo de material granular tiende a privilegiar zonas de menor calidad de roca.”

Esta hipótesis es reforzada por observaciones hechas por Paredes (2012), en donde analizando el sector Parrillas de la Minera Andina de Codelco, se observa que el flujo de material privilegia zonas de menor calidad, en la interacción entre el mineral primario y secundario.

Por lo tanto, Valencia (2014), basándose en su hipótesis y la evidencia experimental anteriormente mostrada, formula un nuevo mecanismo para FlowSim con la intención de representar de forma más fidedigna el flujo gravitacional. Valencia (2014) propone realizar cambios en la función de transición modificando la curva de probabilidad. Actualmente la curva de probabilidad privilegia la elección de la celda que posea menor distancia, sin embargo, esta vez se plantea la lógica de privilegiar también la selección de la celda que posea menor calidad de roca.

La nueva curva de probabilidad propuesta por Valencia se define a continuación.

$$p_i = \frac{d_i^{-N} * RMR_i^{-M}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-N} * RMR_k^{-M}}$$

Ecuación 3: Nueva curva de probabilidad (Flujo Preferencial).

Donde  $p_i$  es la probabilidad de la celda “i”, RMR es el índice de calidad de roca,  $d_i$  es la distancia entre la celda “i” y el vacío, N y M son constantes de ajuste.

Se observa que la nueva curva de probabilidad posee un nuevo factor, el índice de calidad de roca (RMR) junto con un exponente negativo. De esta manera se le otorga una mayor probabilidad a las celdas con menor RMR de ser escogidos. Una mayor o una menor probabilidad depende del valor del nuevo parámetro “M”, que al igual que los otros parámetros (cV y N) es un factor manejable e independiente. Por lo tanto “M” es considerada una constante de ajuste al momento de calibrar FlowSim.

Hay que considerar que la nueva curva de probabilidad (flujo preferencial) sigue dependiendo también de la distancia y además, cabe recordar que Valencia (2014) integra este mecanismo en un simulador prototipo de “FlowSim 2D”, por lo que falta su real implementación en una versión “FlowSim 3D” como lo es FlowSim en su versión 1.0 (lenguaje Matlab) o en su versión 2.0 (lenguaje C++).

## **2.5. Metodología de diseño de Laubscher (1994, 2000)**

Laubscher (1994) a partir de evidencia experimental propone una metodología para determinar el diseño de la mina que asegure un tiraje interactivo y de esta manera prevenir el ingreso temprano de dilución en los puntos de extracción.

Laubscher señala que el diámetro máximo de tiraje aislado, que corresponde al diámetro máximo que alcanza la zona de flujo cuando se realiza la extracción de punto aislado, depende del tamaño de los fragmentos que se encuentran en el flujo. Si los fragmentos son pequeños, el diámetro de la zona de movimiento será menor en comparación cuando hay presencia de fragmentos más gruesos. Un mayor o menor diámetro de tiraje aislado define el espaciamiento entre puntos de extracción que debe haber para que se produzca traslape de las zonas de flujo y exista interacción entre estos (tiraje interactivo). Laubscher define que para la existencia de tiraje interactivo los puntos deben estar espaciados a menos de 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado.

Por otro lado, Laubscher asocia el índice de calidad de la roca (RMR) con la distribución de tamaños que poseerán los fragmentos producto de la fragmentación secundaria en minería de hundimiento. Mientras menor sea el RMR, la roca posee una mayor cantidad de discontinuidades que conllevan a una mayor reducción en el tamaño de los fragmentos (material fino), en cambio, mientras mayor sea el RMR, la roca posee una menor cantidad de discontinuidades que conllevan a una menor reducción en el tamaño de los fragmentos (material grueso).

Los párrafos anteriores permiten a Laubscher relacionar la calidad del macizo rocoso, a través del índice RMR, con el diámetro de tiraje aislado y de esta manera obtener el espaciamiento mínimo y máximo permisible entre puntos de extracción para que se produzca tiraje interactivo (Figura 8).

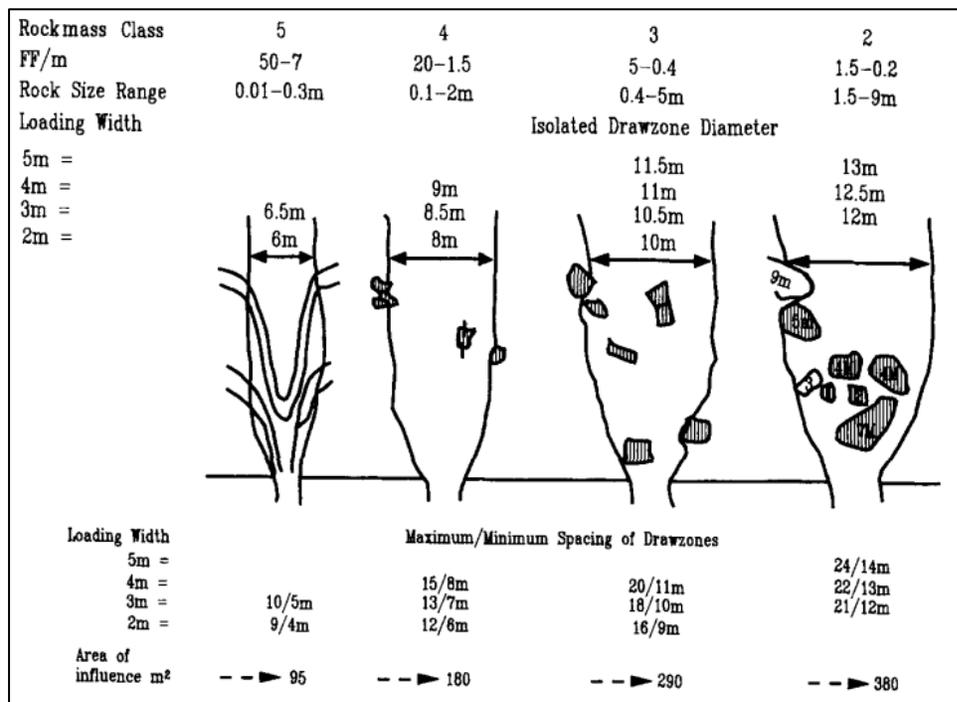


Figura 8: Determinación de espaciamiento entre puntos de extracción (Laubscher,1994).

El espaciamiento entre puntos junto con el RMR de los materiales que se encuentran en la columna de extracción, son utilizados para determinar la altura de interacción (HIZ). HIZ es la altura a la cual las zonas de flujo entre puntos adyacentes se traslapan, ocurriendo tiraje interactivo (Figura 9).

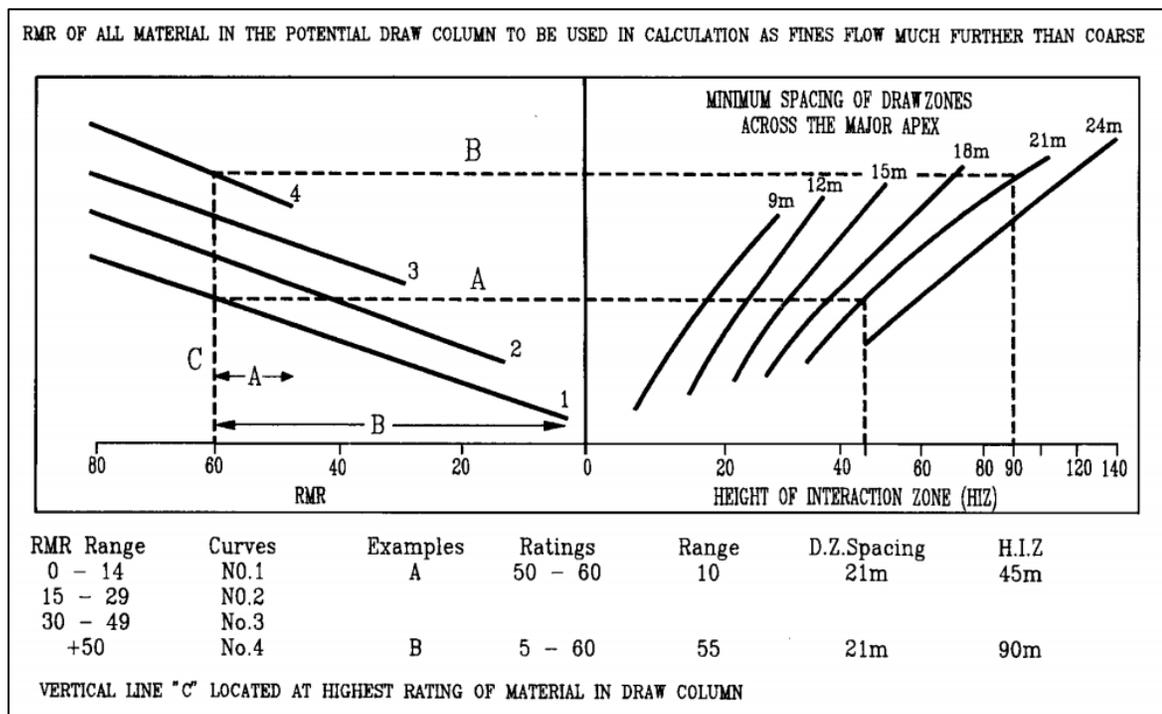


Figura 9: Determinación de altura de interacción (Laubscher, 1994).

Laubscher (1994) define el Punto de Entrada de Dilución (PED) como el porcentaje de columna de mineral que ha sido extraída antes que la dilución aparezca en el punto de extracción y determina una fórmula para calcular el PED.

$$PED = \frac{(H_c \cdot s - HIZ) \cdot dcf}{H_c \cdot s}$$

**Ecuación 4: Determinación del punto entrada de dilución (PED).**

Donde  $H_c$  es la altura de la columna, HIZ es la altura de interacción que se obtiene de la Figura 9, dcf es el factor de control de tiraje (para tiraje uniforme  $dcf = 1$ ) y  $s$  es el factor de esponjamiento de la columna (1,16 para material fino, 1,12 para material medio y 1,06 para material grueso).

Finalmente, Laubscher (1994) plantea que el ingreso de dilución en los puntos de extracción ocurre de manera continua luego de la primera entrada.

## **2.6. Definición de punto de entrada de dilución (PED)**

Analizado anteriormente, Laubscher (1994) define el punto entrada de dilución (PED) como como el porcentaje de columna de mineral que ha sido extraída antes que la dilución aparezca en el punto de extracción. El PED es considerado como un parámetro de gran utilidad en la operación minera y como una importante herramienta comparativa para observar el comportamiento de la dilución en las propias faenas.

Paredes (2012) analiza los datos de extracción de algunas minas de Codelco y define un criterio generalizado para la determinación del punto de entrada de dilución en un punto de extracción. Esto, debido a que las curvas de dilución observadas poseen comportamientos que difieren del perfil teórico de ingreso continuo en aumento a partir del primer ingreso en el punto. En algunas ocasiones, la curva de dilución observada tiende a representar oscilaciones que pueden incluso llegar a cero después de la primera entrada de dilución (comportamiento en forma de pulso o pulsos iniciales). El hecho de que existan distintas curvas con comportamiento en forma de pulso obliga a determinar cuándo resulta significativo un pulso y cuándo representa sólo un “ruido” en la curva. En otras palabras, cuándo la entrada de dilución es significativa luego de la primera entrada de dilución. Después de varios estudios y análisis, Paredes (2012) define que un punto es considerado diluido cuando posee un 3% de dilución acumulada. Este criterio otorga una mayor robustez y previene el ruido de los pulsos de dilución sin perder mayor información o sesgar el estudio.

**PED(3%):** Porcentaje de columna extraída al momento de que se declare un 3% de dilución del contenido acumulado. Para el caso de las minas de Codelco analizadas por Paredes (2012), este es el punto donde la entrada de dilución se vuelve significativa.

De forma más general se define el PED (X%) de un punto como el porcentaje de columna extraída al momento que se declare un X% de dilución acumulada.

## 2.7. Caso estudio: Sector Inca Central Este (Mina El Salvador, Codelco)

El caso de estudio, con el cuál se desea analizar el correcto funcionamiento de FlowSim 3.0 con un volumen de datos real a nivel industrial, corresponde al sector Inca Central Este (ICE), perteneciente a la Mina el Salvador de CODELCO Chile. El sector ICE cuenta con 107 puntos con extracción desde Junio del 2003 hasta Octubre del 2010. La Figura 10 muestra el perfil de toneladas y leyes de cobre extraídas del sector a lo largo de su vida productiva.

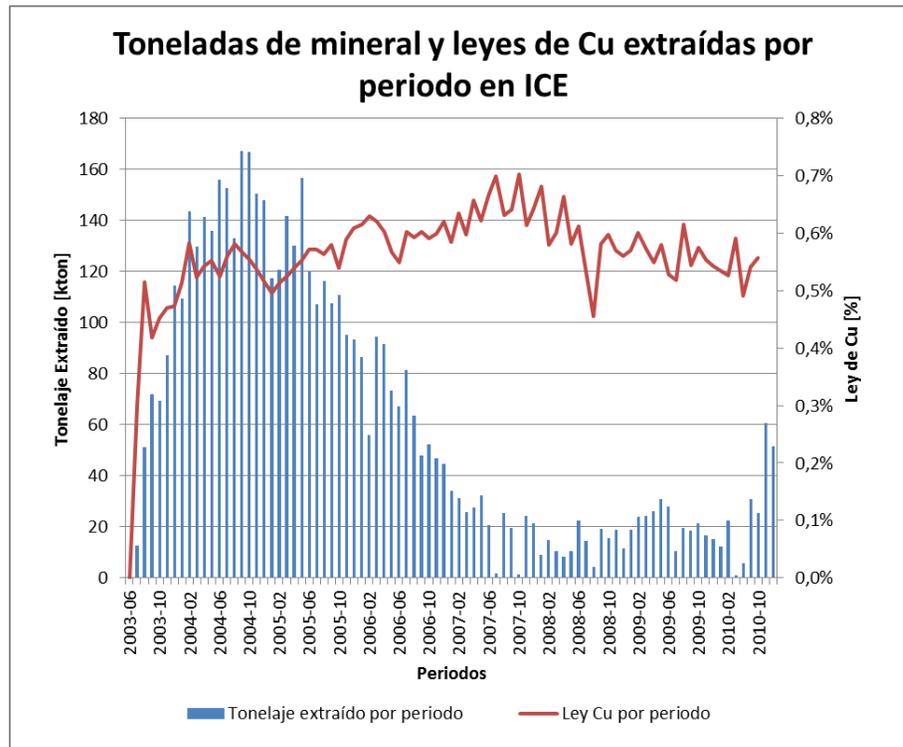


Figura 10: Toneladas de mineral y leyes de Cu extraídas por periodo en ICE.

El resumen de lo mostrado en la Figura 10, se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen extracción sector Inca Central Este, Mina El Salvador.

Sector	Número de puntos con extracción	Tonelaje extraído del sector [kton, mensual]		Leyes de Cu extraídas [% , mensual]	
		Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
ICE	107	60,5	51,5	0,56%	0,09%

El perfil de alturas de columna in-situ se muestra en la Figura 11, las cuáles varían desde los 20 [m] hasta más de 630 [m] desde el noreste hasta al sureste del sector respectivamente. La secuencia de extracción también es presentada en la Figura 11, donde se observa que la extracción avanza desde el noreste hasta el sureste del sector, es decir, desde las alturas de columna in-situ menores hacia las mayores. Además, cabe destacar que la fuente de dilución (quebrado) está ubicada principalmente a un costado del sector.

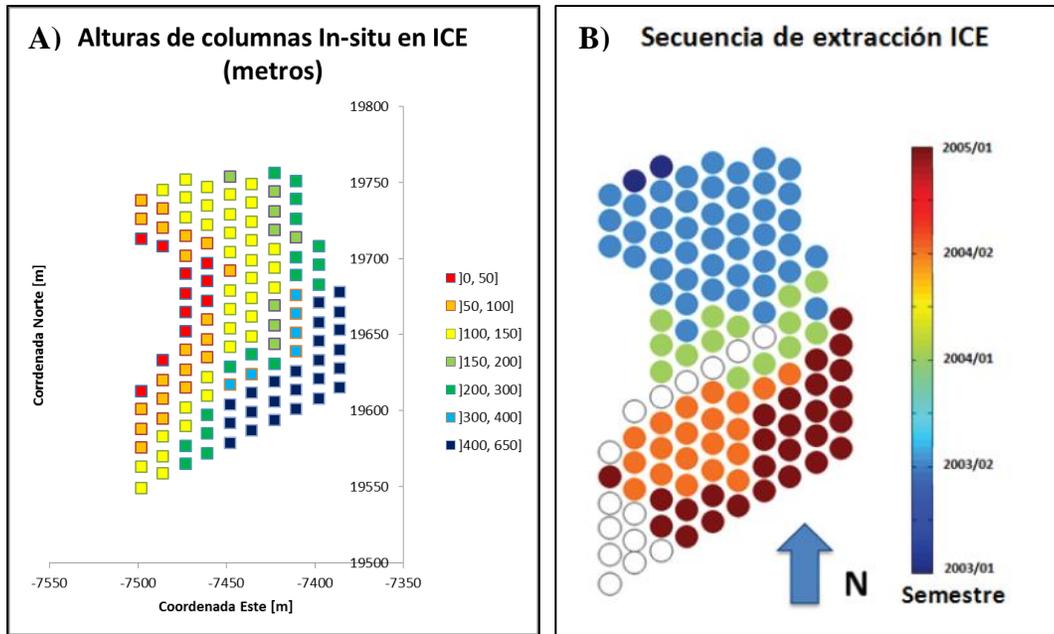


Figura 11: A) Alturas de columna in-situ en ICE – B) Secuencia de extracción en ICE (Paredes, 2012)

El contenido de dilución extraído por período en el sector se presenta en la Figura 12 donde es posible apreciar que la dilución comienza a aparecer en los puntos en octubre de 2003, es decir, 4 meses después de iniciada la extracción y llega a representar hasta un 35% del contenido extraído en 2006. La Tabla 2 indica un resumen de los datos mostrados en la Figura 12.

Tabla 2: Resumen contenido de dilución en sector Inca Central Este, Mina El Salvador.

Sector	Número de puntos		Dilución extraída [kton, mensual]	
	Con Extracción	Con dilución	Promedio	Desviación Estándar
ICE	107	95	6	8,2

La Figura 13 representa una vista en planta del punto de entrada de dilución declarado al 3% del contenido de dilución acumulado (PED (3%)). A partir de la figura se distinguen dos zonas claramente definidas.

- Zona Norte: La entrada de dilución al 3% en esta zona va del 40 al 60% de la columna. A medida que la secuencia avanza hacia el sur, la entrada de dilución es más temprana.
- Zona Sur: En esta zona los puntos casi no poseen una dilución entrada de dilución declarada al 3%.

A pesar de que 95 puntos presentan entrada de dilución (Tabla 2), la cantidad de puntos diluidos al considerar un PED(3%) disminuye a 58. El PED(3%) promedio de estos 58 puntos es equivalente a 55% y presentan una desviación estándar de 36%.

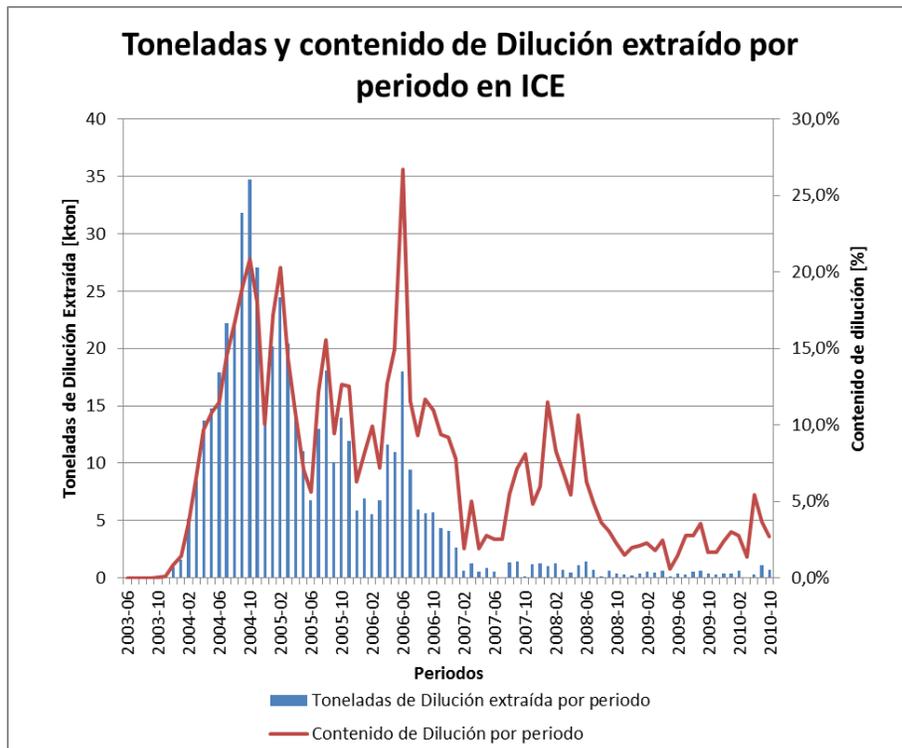


Figura 12: Toneladas y contenido de dilución extraídos por periodo en ICE.

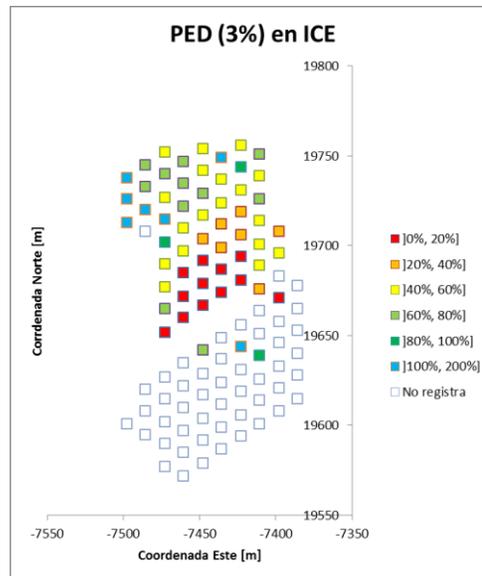


Figura 13: Punto entrada de dilución al 3% (PED(3%)) en ICE (vista planta).

Paredes (2012) analiza y estudia el comportamiento de la entrada de dilución en este sector. Señala que si la secuencia de extracción procede desde las menores alturas de columnas a las más altas (de norte a sur), entonces la fuente de dilución proviene del costado norte. Los puntos de la zona norte del sector ICE son afectados por la entrada dilución y el PED disminuye a medida que la secuencia de extracción avanza. Mientras tanto, los puntos de la zona sur no son afectados debido a la formación de una especie de pilar de roca quebrada, el cuál actúa como una barrera de dilución y que es originado por la inactividad de algunos puntos de extracción (puntos de

vaciado). Por último, Paredes (2012) afirma que el bajo PED en los puntos del centro se debe a dilución lateral, es decir, la formación de un air gap permite que el material diluyente, ubicado a un costado (lado norte), escurra a través del mineral fragmentado hacia los puntos más lejanos (pilar barrera o zona centro). Se obtiene de esta forma, una entrada temprana de dilución.

La heterogeneidad del macizo en este sector (mineral - dilución) otorgan la posibilidad de probar el funcionamiento del nuevo mecanismo de flujo preferencial que se implementa en el simulador para una mejor representación del flujo gravitacional. Lo anterior, junto con un tamaño adecuado del sector para obtener tiempos de simulaciones aceptables y avanzar eficientemente en el desarrollo del estudio, son las principales razones por las que se escoge esta zona como caso de estudio para las posteriores simulaciones en FlowSim 3.0.

Sin embargo, al momento del análisis se deben considerar ciertas limitaciones de la simulación en la reproducción del flujo gravitacional para el sector ICE. Por ejemplo, una de las limitaciones es que en el algoritmo de FlowSim no se consideran situaciones específicas de cada mina. En este caso, la formación de un pilar barrera que impide el paso de la dilución o el mecanismo de dilución lateral con el cuál diluyeron los puntos del centro, podrían ser variables para tener en cuenta.

## 2.8. Colgaduras

Una colgadura corresponde a la formación de un arco estable de rocas de mineral o bloques que se atascan en lo alto de la columna de extracción, impidiendo el libre flujo gravitacional, dejando inoperante el o los puntos de extracción involucrados (Troncoso, 2006).

La sobrecarga presente en la columna de extracción debido a su propio peso genera esfuerzos entre los fragmentos. Esta presión ejercida sigue trayectorias en función del empaquetamiento y la distribución de los mismos fragmentos a través de los puntos de contacto. La configuración adquirida por la trayectoria de esfuerzos se ve afectada por la geometría bajo la cual se encuentre el material (como bateas en el nivel de producción), modificando las trayectorias y generando arcos de esfuerzo dentro del material lo que provoca colgaduras. Estas colgaduras impiden el libre paso del material, imposibilitando la extracción.

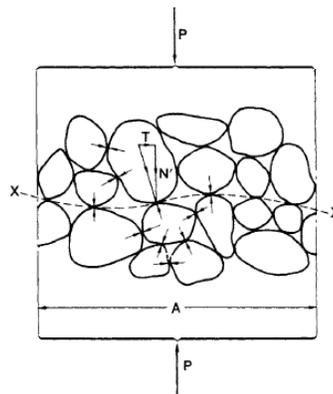


Figura 14: Distribución de esfuerzos en los puntos de contacto entre fragmentos (Craig, 2004).

En minería de hundimiento las colgaduras no necesariamente pueden generarse a nivel de puntos de extracción sino que pueden aparecer en diversas zonas de la columna de mineral. Dependiendo de la altura a la cual se genere el arco, el impacto en la operación es diferente, como también, la forma de mitigarlo. Es por eso que las colgaduras se clasifican en (Maass, 2013):

1. Originadas por encadenamientos naturales de fragmentos de roca de gran tamaño que impiden el flujo de mineral a través de los puntos de extracción.
2. Colgaduras originadas por la compactación de material fino en presencia de humedad. Se forman en la parte inferior de la pila de material fragmentado al interior de la batea, lo que genera un piso de apoyo para fragmentos de gran tamaño, impidiendo el flujo de mineral.
3. Originadas por el diseño y dimensiones de la batea de extracción inadecuada en relación al tamaño de fragmentos que fluyen gravitacionalmente por ella.

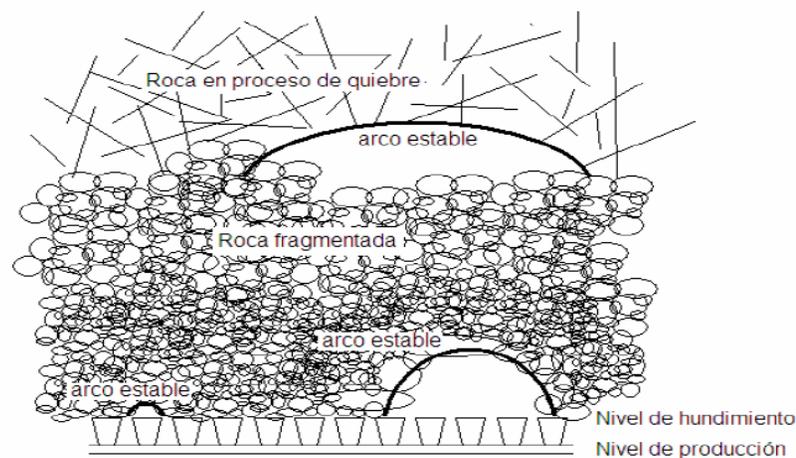


Figura 15: Formación de arcos presentes en minería de hundimiento (Troncoso, 2006).

Grandes arcos formados por fragmentos gruesos en la columna de mineral requieren una gran zona interactiva para desestabilizar el mismo arco o un determinado periodo de tiempo para que algún bloque en el arco pueda fallar. Dentro de los principales factores que influyen en la presencia de eventos de colgaduras se encuentran (Kvapil, 2008).

- Distribución de tamaños de los fragmentos de roca.
- Tamaño máximo de los fragmentos.
- Forma de los fragmentos.
- Rugosidad de la superficie de las partículas.
- Fricción entre las partículas.
- Resistencia de los fragmentos.
- Presencia de finos.
- Contenido de humedad.
- Compresibilidad y compactación.
- Geometría del punto de extracción.

- Magnitud, distribución y dirección de fuerzas y cargas externas.
- Tasa de extracción.

### 2.8.1. Principales parámetros en la formación de colgaduras

Se pueden distinguir principalmente dos tipos de colgaduras en estructuras: asociadas a arcos de rocas y por presencia de material cohesivo. Para las colgaduras asociadas a arcos de roca diversos autores han definido una relación entre la abertura de la estructura (D) y el diámetro máximo de partícula (d), con el fin de determinar el libre flujo del material o la ausencia de flujo.

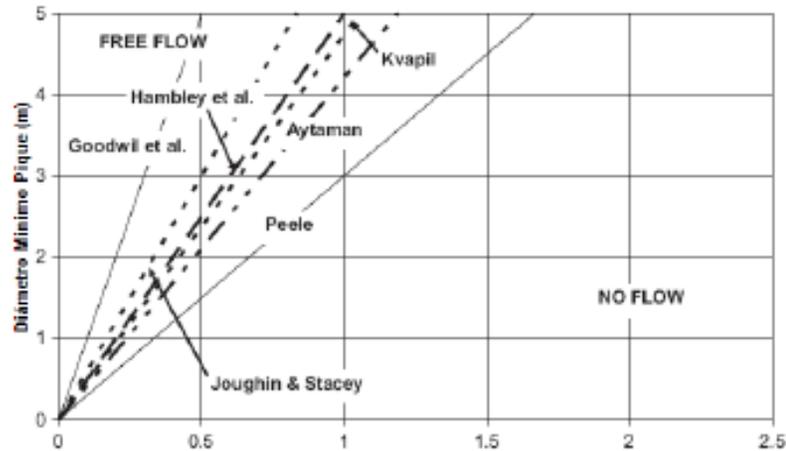


Figura 16: Diámetro de abertura vs tamaño máximo de partícula (Cornejo, 2008).

En función del gráfico anterior (Figura 16) generado a partir de estudios en piques de traspaso, se ha construido la Tabla 3 para determinar el nivel de aparición de eventos de colgadura los cuales impiden el libre flujo de material.

Tabla 3: Condición de flujo en sistemas de traspaso (Hustrulid and Sun, 2004).

Razón	Frecuencia de Colgaduras
$D/d > 5$	Baja
$5 > D/d > 3$	Probable
$D/d < 3$	Muy alta

Las relaciones anteriores surgen a partir de ensayos y experiencias en piques y silos, sin embargo, otorgan una idea de la importancia que tiene la relación entre el tamaño de los fragmentos y el ancho de la abertura por la cual fluye el material, que bien podría ser un punto de extracción.

Tras ensayos realizados a escala de laboratorio (Fuenzalida, 2012), se ha considerado también el efecto del confinamiento (carga vertical) en la capacidad de flujo que presenta el material. Para lo anterior, se definen los siguientes conceptos de flujo.

- Flujo libre: El material fluye libremente sin interrupción debido a la acción de la gravedad a través del punto de extracción.
- Flujo intermitente: El material fluye con interrupciones intermitentes debido a los arcos mecánicos e inestables formados por la compactación del material. Éstos fallan debido a la redistribución de esfuerzos producto de la carga vertical.
- Flujo asistido: Presencia de colgaduras estables que impiden el libre flujo y es necesaria intervención externa para perturbar los arcos y producir el descuelgue.
- No flujo: El material no fluye de ningún modo, inclusive perturbando el arco externamente. Esto es por efecto del alto confinamiento.

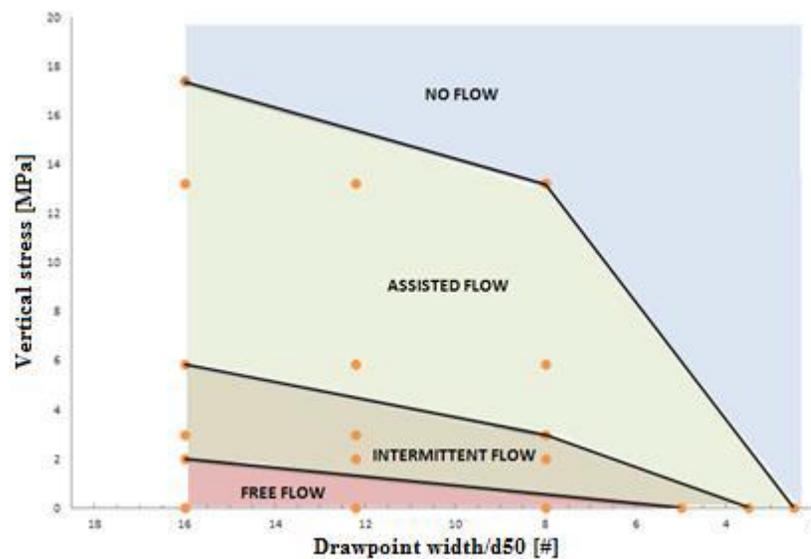


Figura 17: Condición de flujo considerando carga vertical (Fuenzalida, 2012).

De la Figura 17 se observa que a medida que la razón  $D/d$  aumenta, la dificultad del flujo de material para transitar es menor. Además, a medida que la carga vertical o confinamiento aumenta, el flujo presenta mayor dificultad para moverse.

Por otro lado, las colgaduras originadas por presencia de material cohesivo están principalmente relacionadas con la presencia de humedad y material fino en el material quebrado. En la actualidad, los diseños de las infraestructuras mineras no apuntan a prevenir este tipo de arcos, ya sea por su complejidad o escasez de entendimiento.

### 2.8.2. Esfuerzo vertical de una pila fragmentada

El esfuerzo vertical que ejerce la pila fragmentada sobre el nivel de producción no va a generar el mismo esfuerzo que la carga litoestática. Al ser material quebrado, la trayectoria de esfuerzos depende de las zonas de contacto entre fragmentos y por lo tanto se encuentra en continuo cambio a medida que el material fluye por efecto de la gravedad. Esta distribución de esfuerzos genera la aparición de esfuerzos horizontales, los que disminuyen el esfuerzo vertical total del material (producto de su propio peso).

Fuenzalida (2012) propone utilizar la ecuación de Janssen para calcular el valor del esfuerzo vertical de una columna de mineral fragmentada. La ecuación considera esfuerzos verticales y horizontales para realizar un equilibrio de las fuerzas interactuantes y fue derivada a partir de estudios llevados a cabo en silos con material granular.

$$\sigma_{zz}(z) = \frac{\gamma \cdot Rh}{\mu \cdot k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{z \cdot k \cdot \mu}{Rh}\right) \right] + Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{z \cdot k \cdot \mu}{Rh}\right)$$

**Ecuación 5: Ecuación de Janssen (Nedderman, 1992).**

Donde  $\sigma_{zz}$  es el esfuerzo vertical en la base [Pa],  $\gamma$  es el peso específico del material [ $\text{kg/m}^2\text{s}^2$ ],  $Rh$  radio hidráulico de la base de la geometría a considerar [m],  $\mu$  coeficiente de fricción entre el material y las paredes,  $k$  el coeficiente entre esfuerzos horizontales y verticales,  $z$  la altura del material quebrado [m] y  $Q_0$  el esfuerzo vertical [Pa] para  $z = 0$ .

Walker (1996) realizó una corrección al factor  $k$ , representando la relación entre los esfuerzos en función del ángulo de fricción interna del material ( $\phi$ ).

$$k = \frac{1 - \text{sen}^2(\phi)}{1 + \text{sen}^2(\phi)}$$

**Ecuación 6: Corrección para el factor K.**

### 2.8.3. Modelo de colgaduras

Gómez (2014) realiza ensayos de flujo confinado con el objetivo de construir un modelo de estimación de frecuencia de colgaduras. Los ensayos se basan en someter un material fragmentado a diferentes cargas verticales y de esta manera analizar la condición de flujo que se genera. Para observar el efecto de la razón entre el tamaño de la abertura de la estructura, por la cual el material pasa, y el tamaño del fragmento, el estudio se realiza para dos materiales con curvas granulométricas diferentes.

Con el fin de entender el impacto del confinamiento sobre la generación de eventos de colgadura, Gómez propone un modelo simple y capaz de representar sus resultados. De esta manera se presenta el modelo de estimación de colgaduras.

$$H_g = H_{g0} \cdot \exp(-r \cdot \sigma_v)$$

**Ecuación 7: Modelo de estimación de frecuencias de colgaduras (Gómez, 2014).**

Donde  $H_g$  es el material que pasa entre eventos de colgadura [masa/#colgaduras],  $\sigma_v$  corresponde al esfuerzo vertical aplicado [MPa],  $H_{g0}$  y  $r$  son constantes de ajuste del modelo.

A continuación se presenta el modelo ajustado de estimación de frecuencia de colgaduras construido a partir de los resultados obtenidos por Gómez en sus ensayos (Figura 18).

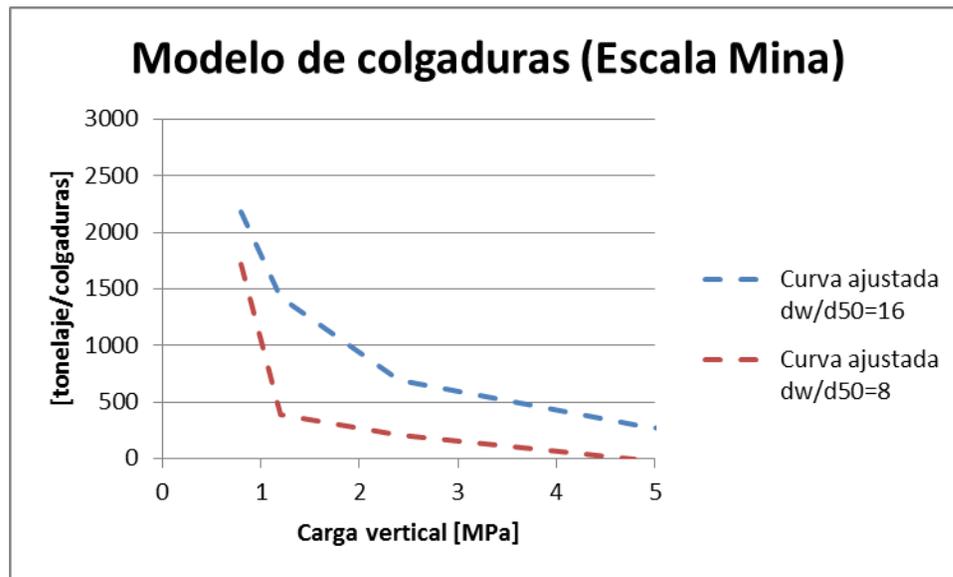


Figura 18: Modelo de curvas de estimación de frecuencia de colgaduras (Gómez, 2014).

Los valores de las constantes de ajustes del modelo para ambas curvas obtenidas en los estudios se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del modelo de colgadura (Gómez, 2014)

Parámetros	Curva $d_w/d_{50}=16$	Curva $d_w/d_{50} = 8$
$H_{go}$	3609	31015
$r$	0,69	3,62

Se observa que ambas curvas se diferencian en la razón entre el ancho de batea ( $d_w$ ) y el  $d_{50}$  de la curva de distribución granulométrica del material. También se puede concluir que a menor carga vertical la cantidad de material a ser extraído entre colgaduras aumenta y por lo tanto la aparición de estos eventos disminuye. Por otro lado si la razón entre la abertura de la batea y el tamaño medio de los fragmentos disminuye, la cantidad de material a ser extraído entre colgaduras disminuye y por lo tanto la aparición de estos eventos aumenta.

## 2.9. Conclusiones del capítulo

El uso de FlowSim como herramienta de simulación de flujo, con fines de uso industrial para el diseño y la planificación minera resulta una opción atractiva por la simpleza y rapidez que entregan estos modelos basados en autómatas celulares.

La transcripción del algoritmo de FlowSim 1.0 a lenguaje C++, permite a esta nueva versión (FlowSim 2.0) poseer una mayor capacidad de análisis y procesamiento de datos en una menor

cantidad de tiempo. Este avance da pie a la posibilidad de implementar nuevos mecanismos con el fin de mejorar la capacidad de predicción del simulador y sin el desmedro de un aumento considerable en los tiempos de simulación.

Siguiendo esta línea y basado en observaciones y evidencia experimental, se elabora un nuevo mecanismo llamado flujo preferencial, el cuál otorga mayor capacidad de movimiento a fragmentos de menor calidad (menor RMR). Sin embargo, la implementación de este mecanismo se realiza en un prototipo de “FlowSim 2D”. Por otro lado, las colgaduras en puntos de extracción son interferencias operacionales que impiden la extracción del material. Esto produce grandes costos asociados a cambios en la carta de extracción o en la planificación de la mina que no son considerados en el proceso de simulación.

El presente trabajo busca avanzar en el desarrollo del simulador FlowSim 2.0 hacia una versión 3.0. Para lo anterior, se determina implementar el mecanismo de flujo preferencial en FlowSim 3.0 y se busca elaborar una propuesta de predicción de colgaduras para que en el futuro sea implementada. El objetivo es mejorar la capacidad de predicción de entrada de dilución del simulador y que en unos años más adelante, FlowSim sirva como una herramienta complementaria para el diseño y planificación de la mina.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología a través de la cual se desarrolla el presente trabajo se divide en 2 etapas, las cuales permiten alcanzar los objetivos del estudio. Un esquema de la metodología de trabajo se presenta en la Figura 19.

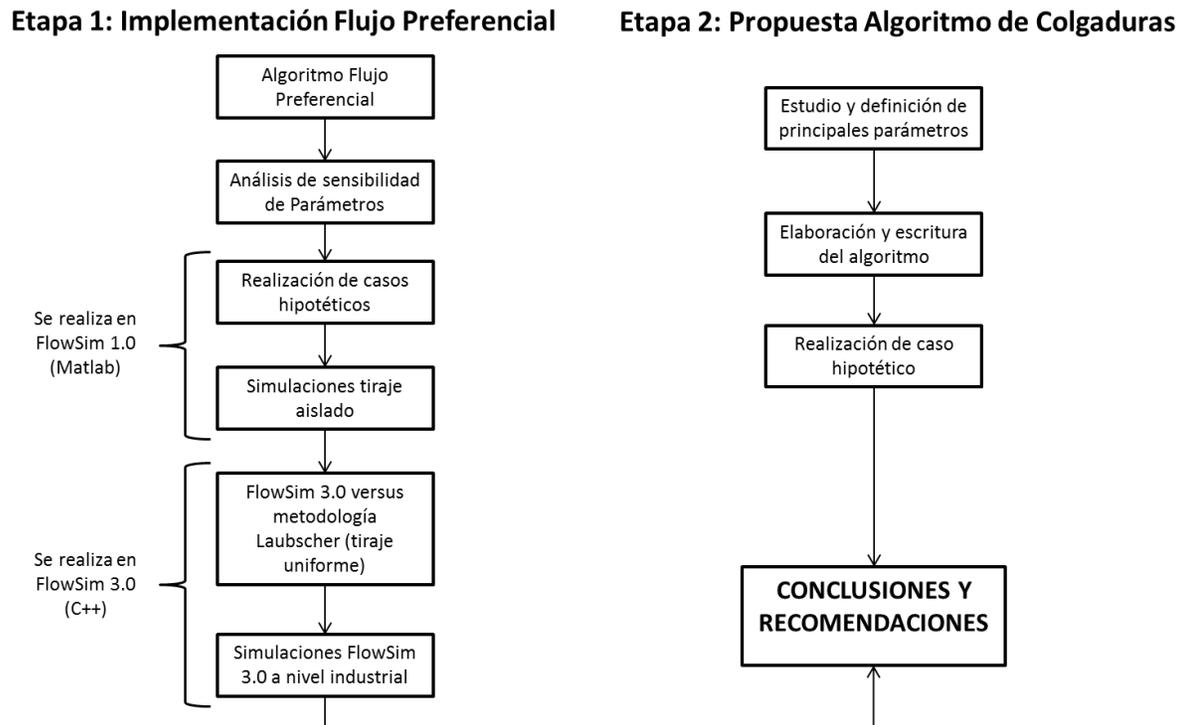


Figura 19: Diagrama de flujo de la metodología del presente trabajo.

#### 3.1. ETAPA 1: Implementación del flujo preferencial

Algoritmo flujo preferencial: Se realiza una modificación en la definición de la curva de probabilidad de ascenso de vacíos, añadiendo el RMR como nuevo factor. Además se diseña el diagrama de flujo del algoritmo de flujo preferencial considerando mantener la base del ahora antiguo algoritmo de FlowSim. En base al diagrama de flujo se desarrolla el código del algoritmo de flujo preferencial para FlowSim 1.0 (versión Matlab) como un prototipo para la realización de estudios preliminares y para FlowSim 3.0 (versión C++) como un mecanismo definitivo. Se define el fino y grueso como nuevos estados para FlowSim para representar de una mejor manera la presencia de distintas granulometrías y/o litologías y de esta forma otorgar una mayor preferencia de movimiento en el flujo al estado fino.

Análisis de sensibilidad de parámetros: Se desarrolla un análisis de sensibilidad de las constantes de ajustes (N, cV y M) para observar sus efectos e incidencias en la simulación. Lo anterior con el fin de:

- Ayudar en la toma de decisión sobre el número de simulaciones a realizar y el valor de las constantes en cada una estas simulaciones.
- Fortalecer la etapa de análisis de resultados.

Realización de casos hipotéticos: Se realizan simulaciones de casos hipotéticos para verificar la correcta implementación del flujo preferencial en el simulador FlowSim 1.0. La verificación se lleva a cabo mediante el análisis de dilución acumulada de las simulaciones e imágenes del avance del flujo gravitacional.

Simulaciones tiraje aislado: Utilizando FlowSim 1.0 con el mecanismo de flujo preferencial implementado, se realizan simulaciones desde un único punto de extracción y variando cada una de las constantes de ajustes con el objetivo de observar el efecto de estas variaciones en los resultados finales. Para lo anterior, se construye una mina virtual con altura de columna de mineral de 240 [m] (material grueso) y sobre esta columna se dispone de material estéril (dilución fina). Se realiza extracción total para cada simulación de 1 Mton (100% de la extracción) con el fin de observar la evolución de la dilución posterior al primer ingreso. Por último, el tamaño de los bloques es de  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  con una densidad de  $1,6 \text{ t/m}^3$ . El análisis de los resultados se lleva a cabo mediante el estudio del elipsoide de extracción de cada simulación y la curva de dilución acumulada.

Comparación entre FlowSim 3.0 y metodología de Laubscher: Ya terminado el proceso de desarrollo de FlowSim 3.0, se realizan simulaciones de tiraje uniforme variando el espaciamiento entre los puntos y el parámetro M con el fin de estudiar los resultados y analizar los efectos de estas variaciones. Para lo anterior, se construye una mina virtual con altura de mineral de 200 [m] (material grueso) y sobre esta columna se encuentra el material estéril. La extracción se realiza a través de 18 puntos distribuidos mediante una configuración de malla tipo Teniente y el tamaño de los bloques es de  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  con una densidad de  $1,6 \text{ t/m}^3$ . Además, el análisis de resultados se encuentran basados en el PED al 0%, 3% y 5%. Por último, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos desde estas simulaciones y lo indicado en la metodología de Laubscher en el cálculo del PED según el espaciamiento de los puntos de extracción.

Simulaciones Flowsim 3.0 a nivel industrial: De manera de avanzar en el estudio del mecanismo de flujo preferencial implementado en FlowSim 3.0, se recolecta información de extracción de alguna mina (en este caso sector Inca Central Este de la mina El Salvador de Codelco) con el fin de analizar el correcto funcionamiento del mecanismo con volúmenes de datos real a nivel industrial. El análisis se realiza comparando resultados simulados versus los resultados obtenidos en la mina y se llevan a cabo en dos ámbitos. Primero, se compara la capacidad predictiva del simulador en términos de tonelaje, ley, dilución acumulada y entrada de dilución (fecha) a nivel global del sector, y luego, en términos de punto entrada de dilución (PED(3%)) a nivel de puntos de extracción. La comparación entre resultados mina y resultados simulados se realiza mediante herramientas comparativas como el Error Cuadrático Medio, el Error Relativo Medio o el índice de Confiabilidad, los cuáles son definidos más adelante. Por último, se lleva a cabo un contraste entre los resultados simulados obtenidos con FlowSim y los obtenidos mediante REBOP (otro simulador de flujo gravitacional).

### **3.2. ETAPA 2: Propuesta algoritmo de colgaduras**

Estudio y definición de principales parámetros: En esta primera etapa se determinan cuáles son las variables que más inciden en el proceso de formación de colgaduras y de qué manera se pueden calcular.

Elaboración y escritura del algoritmo: Se elabora una propuesta para predecir la formación de estos eventos de colgadura considerando el efecto de los parámetros anteriormente escogidos. Además, se debe considerar su futura implementación en el simulador FlowSim 3.0, por lo que se debe tener en cuenta las características que definen a este simulador al momento de elaborar esta propuesta. Por último, se realiza la escritura del código de la propuesta de colgaduras para FlowSim 1.0 en lenguaje Matlab a modo de prototipo para observar el funcionamiento y características de este mecanismo.

Realización de caso hipotético: A modo de analizar el efecto de la fragmentación (número de bloque finos y gruesos presentes) en el resultado final de este algoritmo de colgaduras, se realiza un estudio de un caso hipotético. Para esto, se considera una discretización de bloques de  $2 \times 2 \times 2$  [m<sup>3</sup>], un largo de batea de 10 [m] y un ancho de galería de 4 [m], por lo que el plano de bloques que se genera a la altura de la visera de la batea resulta de una dimensión de 2 x 5 bloques. El estudio varía el número de bloques finos y gruesos presentes en este plano y analiza el efecto de esta variación en el resultado.

## 4. IMPLEMENTACION DEL FLUJO PREFERENCIAL

Esta sección abarca la implementación del flujo preferencial en el desarrollo de FlowSim 3.0, así como también la verificación de su correcta indexación. Además, abarca el análisis de sensibilidad de las constantes de ajustes de FlowSim 3.0 y el análisis del comportamiento del simulador en casos minas con gran cantidad de datos (proceso de calibración).

### 4.1. Algoritmo flujo preferencial

El nuevo mecanismo de flujo preferencial plantea la lógica de privilegiar la selección de la celda que posea una menor calidad de roca, aunque también sigue considerando la lógica de privilegiar la celda que se encuentre más cercana al vacío (inverso a la distancia) (ver ecuación 3). A la definición de la curva se agrega el índice de calidad de roca (RMR) junto con un exponente negativo (parámetro M). De esta manera se le otorga una mayor probabilidad a las celdas con menor RMR de ser seleccionadas por el vacío en ascenso.

Por otra parte, debido a que el valor del RMR depende de cada celda, la curva de probabilidad dependerá de las celdas vecinas que se encuentren sobre el vacío al momento de ascender. Por lo anterior, la curva debe ser recalculada cada vez que un vacío cumpla la restricción de ascenso. A continuación, se presenta el nuevo esquema del algoritmo principal con el cual los vacíos ascienden en FlowSim. Este algoritmo considera la implementación del flujo preferencial (nueva curva de probabilidad).

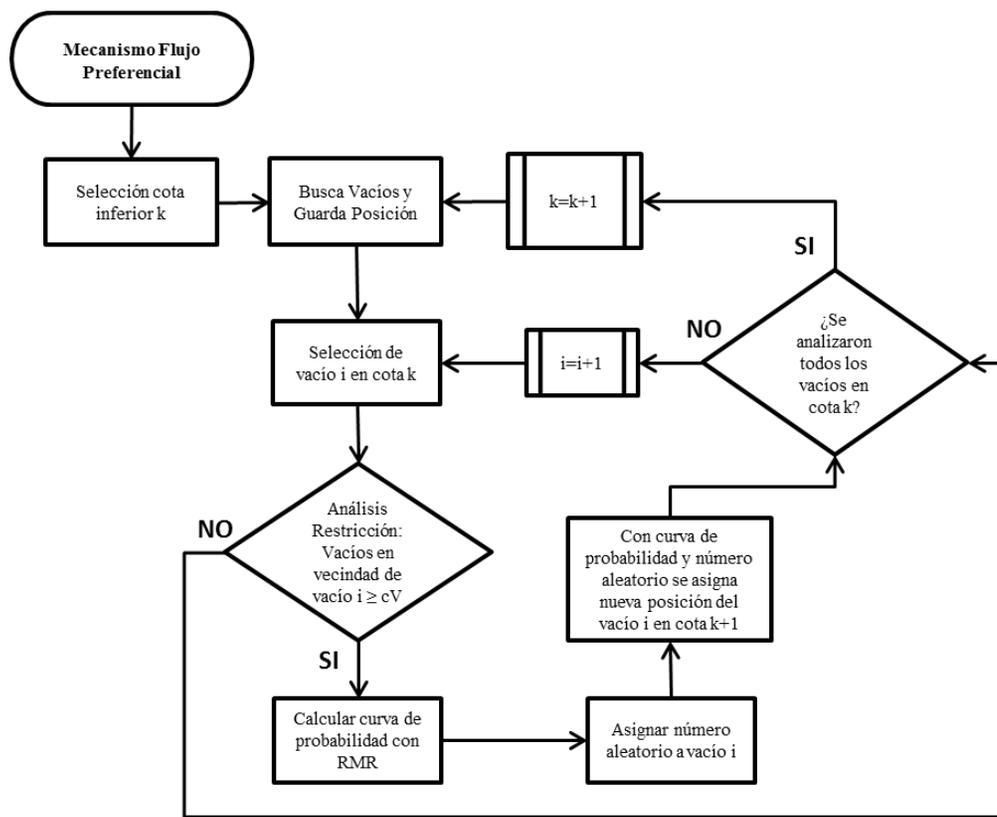


Figura 20: Esquema general del algoritmo de ascenso de vacío considerando flujo preferencial.

Como se mencionó anteriormente, en el esquema (Figura 20) se observa que la nueva curva de probabilidad (flujo preferencial) es calculada cada vez que el vacío en estudio cumple con la restricción de ascenso. En comparación con el ahora antiguo algoritmo de ascenso de vacíos (ver Figura 5), la curva de probabilidad es calculada sólo una vez en la simulación. Lo anterior genera un aumento en la cantidad de cálculos cuando se considera flujo preferencial y por lo tanto un posible aumento en los tiempos de simulación.

El código del algoritmo de flujo preferencial se encuentra detallado en la sección Anexos A.2.

#### 4.1.1. Flujo preferencial y migración de finos

Laubscher (1994) sugiere que una mayor diferencia de calidad de roca (RMR) a lo largo de la columna de mineral, produce un aumento en la altura de interacción (HIZ) entre los puntos de extracción que tiene su efecto en una disminución del PED, es decir, se genera una entrada temprana de la dilución en los puntos. Armijo et al (2014), basándose en las observaciones de Laubscher (1994), señala que si se tiene una columna de mineral (material grueso con alto RMR) y sobre esta columna existe material quebrado o estéril fino (dilución fina y bajo RMR), se obtiene un ingreso temprano de la dilución en los puntos, es decir, se obtiene un bajo PED. En esta situación, la dilución fina, que se encuentra sobre la columna de mineral, percola a través de esta columna para ingresar al punto de extracción de manera más rápida que el mineral (Figura 21).

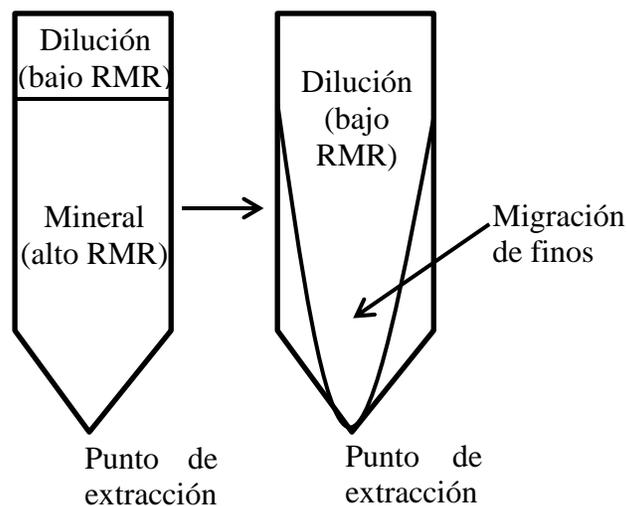


Figura 21: Representación migración de finos (Armijo et al., 2014)

De la observación anterior, se puede concluir que los fragmentos con menor RMR (partículas finas) poseen una mayor capacidad de movimiento que fragmentos con un mayor RMR (partículas gruesas). Esta relación del RMR con la capacidad de migración de las partículas finas, permite asociar el mecanismo de flujo preferencial con este proceso y de esta manera representar en el simulador la migración de finos.

#### 4.1.2. Definición de nuevos estados: grueso y fino.

La implementación del flujo preferencial tiene por objetivo representar la tendencia del flujo de dirigirse hacia zonas que poseen menor calidad de roca, es decir, representar una preferencia de movimiento por bloques que presenten un menor RMR. Por otro lado, se logra establecer una relación entre la migración de finos a través de la columna de mineral (material grueso) y el mecanismo de flujo preferencial. En otras palabras, representar una mayor capacidad de movimiento del material fino a través de la columna por sobre el material grueso. Para implementar en la simulación de una mejor manera esta mayor capacidad de movimiento del material fino por sobre el material grueso, se define el fino y el grueso como nuevos estados para FlowSim 3.0. Estos estados poseen los mismos atributos que el estado granular, la única diferencia entre estos estados es un menor o un mayor valor del RMR y de esta manera otorgar mayor preferencia de movimiento a bloques que posean un menor RMR (lógica del flujo preferencial).

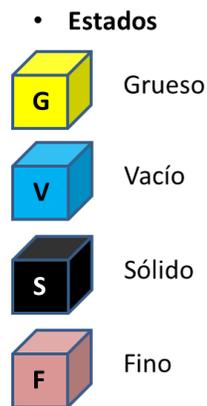


Figura 22: Nuevos estados en FlowSim con la implementación del flujo preferencial.

Cuando el modelo de bloques posee los valores de RMR para cada bloque no es necesario definir cuáles bloques son finos y cuáles bloques son gruesos, debido a que el RMR ya viene definido. Sin embargo, cuando no se tiene información sobre este índice, es necesaria la definición de los estados finos y gruesos ya que simplifican la heterogeneidad compleja del material. Luego, se requieren responder a dos preguntas. ¿Cuáles bloques considerar como finos y cuáles bloques considerar como gruesos? ¿Qué valor de RMR asignar a cada estado (fino y grueso) para que los bloques finos tengan una mayor probabilidad de descender por sobre los gruesos?

¿Cuáles bloques considerar como finos y cuáles bloques considerar como gruesos? Un factor que puede ayudar a determinar bloques finos y gruesos es el factor litológico, por ejemplo, un sector con roca mineral in situ sería considerado como material grueso si se encuentra rodeado en el nivel superior por material quebrado producto de extracciones previas, el cual sería considerado como material fino. Otro ejemplo es si se tiene roca mineralizada de origen andesítico (material grueso de alta calidad) y se encuentre adyacente a rocas sedimentarias (material fino de baja calidad). Un segundo factor que puede ayudar a determinar qué bloques considerar como finos o gruesos es el tamaño medio de los fragmentos, según la literatura, fragmentos con diámetros menores a 25 cm son considerados material fino mientras que fragmentos con diámetros superiores a los 1,5 metros son considerados material grueso.

¿Qué valor de RMR asignar a cada estado (fino y grueso) para que los bloques finos tengan una mayor probabilidad de descender por sobre los gruesos? La mayor probabilidad de movimiento entre un material y otro, dado por el flujo preferencial, es relativa, es decir, depende con qué material se está comparando. Por ejemplo:

- Un fragmento de RMR 45 tiene una mayor probabilidad de movimiento si se compara con otro fragmento de RMR 90.
- El mismo fragmento de RMR 45 tiene una similar probabilidad de movimiento si se compara con otro de RMR 50.
- Finalmente, el mismo fragmento de RMR 45 tiene una menor probabilidad de movimiento frente a otro fragmento de RMR 10.

Para los estudios posteriores, se asigna al nuevo estado fino un RMR de 10 y al estado grueso un RMR de 70. Con estos valores de RMR se tiene una clara diferencia relativa, y esto se reflejará en la curva de probabilidad, donde los bloques finos tendrán una mayor probabilidad de descender que los bloques gruesos, lo que se traduce en una mayor capacidad de movimiento. Cabe destacar que estos valores de RMR no necesariamente tienen una coincidencia con la calidad de la roca real y es sólo un valor de referencia para conseguir el objetivo indicado en la probabilidad de movimiento.

## **4.2. Análisis de sensibilidad**

El estudio de sensibilidad de las constantes de ajustes (N, M y cV) se realiza por los siguientes fines:

- Conocer los efectos que producen en los resultados de la simulación.
- Determinar el rango de valores en los que puede variar cada parámetro como una ayuda para el futuro usuario de FlowSim.

### *4.2.1. Parámetro N (sin flujo preferencial)*

Se presenta un análisis de sensibilidad del parámetro N para observar el comportamiento de las probabilidades. En este caso, el estudio se realiza sin el mecanismo de flujo preferencial, debido a que no se desea considerar el efecto del parámetro M. (ecuación 2).

En la Figura 22 se indica la probabilidad que tiene cada uno de los bloques de ser escogidos para intercambiar posición con el vacío en estudio del nivel inferior. Recordar que los bloques se dividen en 1 central, 4 laterales y 4 esquinas. Además los 4 bloques laterales poseen la misma probabilidad entre ellos, al igual que los 4 bloques esquina.

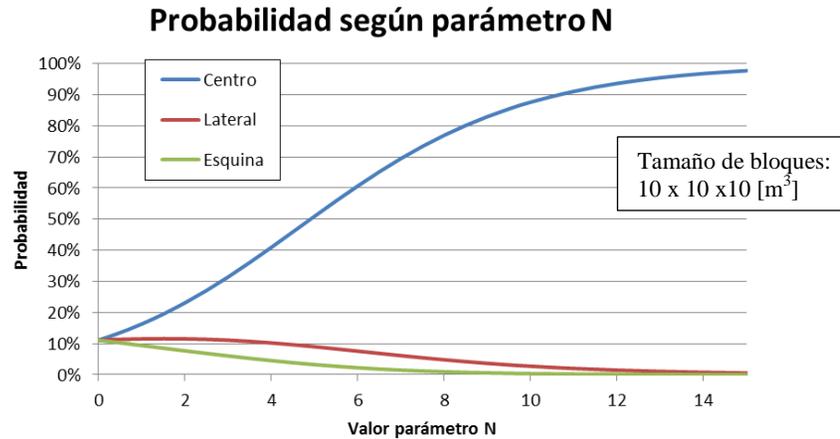


Figura 23: Probabilidad de selección de bloque según el valor del parámetro N.

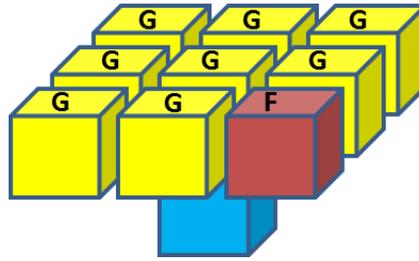
Se observa que cuando N es cero hay una equivalencia en las probabilidades, es decir, se anula la dependencia de la distancia. Sin embargo, a medida que N crece se atribuye una mayor importancia al inverso de la distancia y se asigna una mayor probabilidad de movimiento al bloque central el cual posee menor distancia. En consecuencia, a medida que N crece la probabilidad de los bloques laterales y de las esquinas se reduce. La probabilidad que más rápido cae es el bloque esquina ya que posee la mayor distancia al vacío en estudio.

Debido a la lógica del inverso a la distancia que posee FlowSim en su función de transición (curva de probabilidad), el parámetro N, al estar acompañado de un signo negativo en el exponente de la distancia, debe ser siempre positivo. Por lo tanto, su mínimo valor es cero y en este punto todas las celdas poseen la misma probabilidad de ser escogidas (equi-probabilidad).

Además, cuando N toma el valor de 12, la probabilidad de movimiento del bloque central es aproximadamente 95%, mientras que la probabilidad de los bloques laterales y de esquina es casi nula. Al aumentar N desde este punto, la probabilidad de movimiento de los bloques no sufre cambios significativos, por esta razón se determina para efectos prácticos sugerir al usuario un valor máximo para el parámetro N equivalente a 12.

#### 4.2.2. Parámetro M (con flujo preferencial)

En este caso, el estudio se realiza con el mecanismo de flujo preferencial (ecuación 3). El análisis de sensibilidad para el parámetro M posee un mayor grado de dificultad, debido a que la curva de probabilidad o función transición cambia continuamente ya que depende de la configuración de los bloques presentes en algún instante dado. Por esta razón, en la Figura 24 se presenta la configuración de bloques en la que se basa el posterior estudio de sensibilidad de M. La configuración de análisis posee ocho bloques granulares (grueso) y un bloque fino ubicado en una de las cuatro celda esquina.



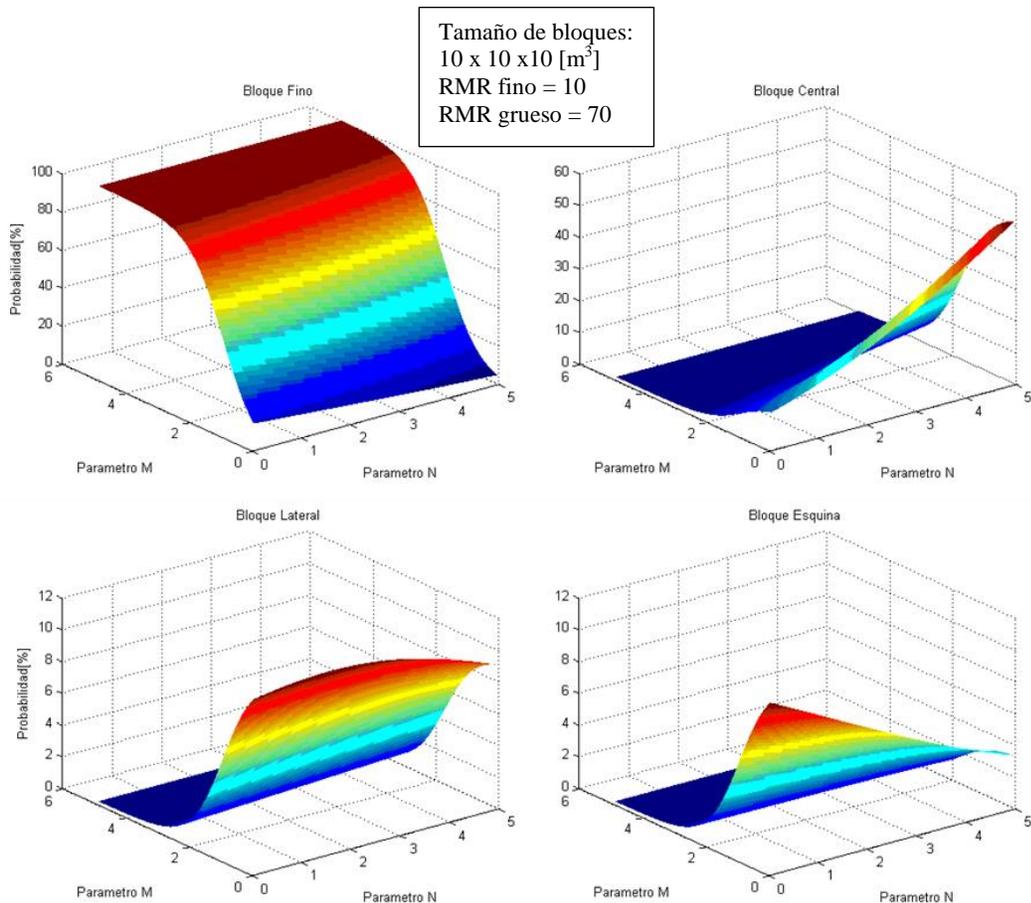
**Figura 24: Configuración de bloques para análisis de sensibilidad del parámetro M.**

La probabilidad de movimiento de cada uno de los bloques se presenta en gráficos independientes. En este caso la probabilidad depende de dos variables, N y M, por lo que el gráfico obtenido posee tres ejes. La Figura 25 muestra los gráficos mencionados anteriormente y se observa que, para un M constante, el parámetro N actúa de la misma manera que en el caso anterior, es decir, a medida que el valor de N aumenta, se reduce la probabilidad de movimiento de los bloques ubicados en las esquinas y en los costados (laterales), mientras que la del bloque central aumenta.

Por otro lado, para un N constante, a medida que el parámetro M aumenta, la probabilidad de movimiento de los bloques granulares (gruesos) disminuye, mientras que la probabilidad de los bloques finos aumenta. Por ejemplo, para un N constante igual a 2, cuando M vale 0 se tiene una probabilidad para el bloque grueso central de 23%, mientras que el bloque fino ubicado en la esquina posee una probabilidad de 8%. Por el contrario, cuando M aumenta su valor a 2, la probabilidad del bloque grueso central disminuye a 5%, mientras que el bloque fino aumenta su probabilidad a un 80%.

Debido a la lógica de otorgar mayor preferencia a bloques con menor calidad de roca (menor RMR) en la curva de probabilidad, el exponente del RMR en la ecuación siempre debe ser negativo. Para mantener esta lógica, el parámetro M, al estar acompañado de un signo negativo, debe ser siempre positivo y de esta manera mantener el valor negativo sobre el exponente. Por lo tanto, el mínimo valor de M debe ser cero.

Además, cuando M toma el valor de 3, la probabilidad de movimiento del bloque central es aproximadamente 97%, mientras que la probabilidad de los bloques laterales y de esquina es casi nula. Al aumentar M desde este punto, la probabilidad de movimiento en los bloques no sufre cambios significativos. Por esta razón se determina para efectos prácticos sugerir al usuario un valor máximo para el parámetro M equivalente a 3.



**Figura 25: Probabilidad de selección de bloque según el valor del parámetro N y M.**

Para finalizar el análisis del parámetro M, se realiza un estudio del efecto del valor del RMR fino y del RMR grueso. Para lo anterior, se utiliza la configuración de bloques de la vecindad indicada en la Figura 24 y se procede a cambiar los valores acordados para el RMR fino = 10 y para el RMR grueso = 70 por RMR fino = 60 y RMR grueso = 70, es decir, se realiza un cambio en la diferencia relativa del RMR de 60 a 10.

En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos de las probabilidades de elección para cada bloque que se encuentra en el nivel superior de la vecindad del vacío en estudio. Se observa que si se varía el valor del RMR, sea del fino o del grueso, es posible obtener el mismo resultado del Caso A en el Caso B variando sólo el parámetro M. Por lo tanto, se concluye que no es relevante el valor que posea el RMR para el fino o para el grueso, debido a que el parámetro M es la constante de ajuste que atribuye una mayor o una menor probabilidad al variar su valor según sea el caso. Lo único relevante es que el valor del RMR del material fino debe ser menor que el valor del RMR del material grueso para producir el efecto de preferencia de movimiento de los bloques finos en el flujo preferencial. En resumen, a medida que la diferencia de RMR entre fino y grueso disminuye, el parámetro M debe aumentar su valor para obtener el mismo set de probabilidades. A modo de sugerencia y como se indica en la sección anterior se recomienda al usuario, si es que no posee datos sobre el RMR de los materiales, utilizar para el fino un RMR de 10 y para el

material grueso un RMR de 70. En el presente informe los diversos estudios y análisis poseen estos valores.

<b>CASO A</b>			<b>CASO B</b>		
RMR Fino = 10			RMR Fino = 60		
RMR Grueso = 70			RMR Grueso = 70		
Dif. RMR = 60			Dif. RMR = 10		
M = 0.5			M = 6		
5%	10%	5%	5%	10%	5%
10%	32%	10%	10%	32%	10%
13%	10%	5%	13%	10%	5%

Figura 26: Probabilidad de los bloques según valor de RMR para finos y gruesos y valor de parámetro M.

#### 4.2.3. Restricción cV

El vacío en estudio asciende solamente si la cantidad de vacíos en la vecindad es mayor o igual a la restricción cV. La función que cuenta los vacíos en la vecindad también cuenta al mismo vacío en estudio. Teniendo en conocimiento lo anterior, es momento de analizar los rangos de valores posibles para cV.

El valor mínimo para cV es uno, en esta situación el vacío en estudio cumple por sí mismo la restricción, ya que la función cuenta vacíos lo considera. De esta forma el vacío puede ascender por sí solo de manera de alcanzar el nivel mayor.

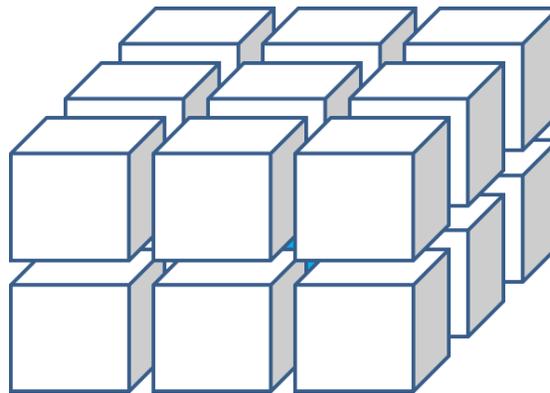


Figura 27: Vecindad de celdas.

La máxima cantidad de vacíos que se pueden contar es 18, debido a que la vecindad se compone por 18 celdas (9 celdas en el nivel inferior y 9 celdas en el nivel superior) y que incluyen al vacío en estudio. Sin embargo, si el nivel superior se encuentra lleno de vacíos, el vacío en estudio no puede ascender y la simulación queda atrapada en un loop (intercambio de posición entre vacíos). Por esta razón es necesario que el valor máximo de cV sea siete u ocho, de esta manera siempre

habrá al menos uno o dos bloques no vacío en el nivel superior que pueda intercambiar posición con el vacío en estudio.

Finalmente, del análisis de sensibilidad se obtiene el rango permisible de las constantes de ajustes que el usuario debe utilizar para simular en FlowSim y cuyos valores son indicados en la Tabla 5.

Tabla 5: Rango permisible de valores para las constantes de ajustes.

Constantes de Ajustes	Valor Mínimo	Valor Máximo
N	0	12
M	0	3
cV	1	7-8

### 4.3. Casos hipotéticos

El algoritmo de flujo preferencial es implementado también en FlowSim 1.0 (lenguaje Matlab) como un prototipo para la realización de estudios preliminares.

De forma conceptual se plantean los siguientes casos hipotéticos para observar y demostrar el buen funcionamiento del flujo preferencial en la simulación. Para ello se construyen dos escenarios 3D que cuentan con seis bateas (doce puntos de extracción) cada uno. Ambos escenarios son delimitados por una interfaz que diferencia calidades de roca, el primer escenario es delimitado verticalmente y el segundo escenario es delimitado horizontalmente (Figura 28).

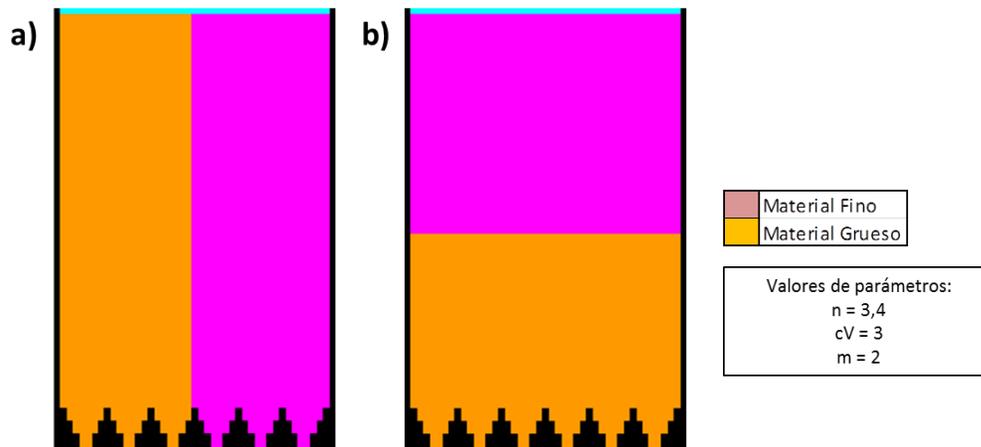


Figura 28: Casos hipotéticos (Vista lateral)  
a) Caso Vertical – b) Caso Horizontal

Como se muestra en la Figura 28, en ambos escenarios se encuentra material fino (RMR=10) y material grueso (RMR=70). Las simulaciones se realizan con los valores de parámetros indicados en la misma figura.

En el primer caso se realiza extracción uniforme en los 6 puntos ubicados en la zona con material grueso, en primera instancia se simula sin considerar el mecanismo de flujo preferencial y luego con el mecanismo. En el segundo caso se realiza extracción uniforme de todos los puntos. Al igual que en el primer caso, se simula sin considerar el mecanismo de flujo preferencial ( $M = 0$ ) y luego considerando el mecanismo ( $M = 2$ ).

En ambos casos se plantea como material diluyente el material fino para realizar un análisis de dilución acumulada. Los resultados obtenidos tanto del caso vertical como del caso horizontal se presentan a continuación.

#### 4.3.1. Caso vertical

Para el análisis del Caso Vertical, se llevan a cabo las comparaciones de las dos simulaciones realizadas, una sin considerar el mecanismo de flujo preferencial y la otra considerando el mecanismo.

Para una misma cantidad de material extraído, se presenta la columna de extracción y el comportamiento del flujo (Figura 29). La diferencia de colores corresponde a la diferencia en calidad de roca explicado anteriormente, mientras que los bloques celestes son los vacíos que ascienden a través de la columna.

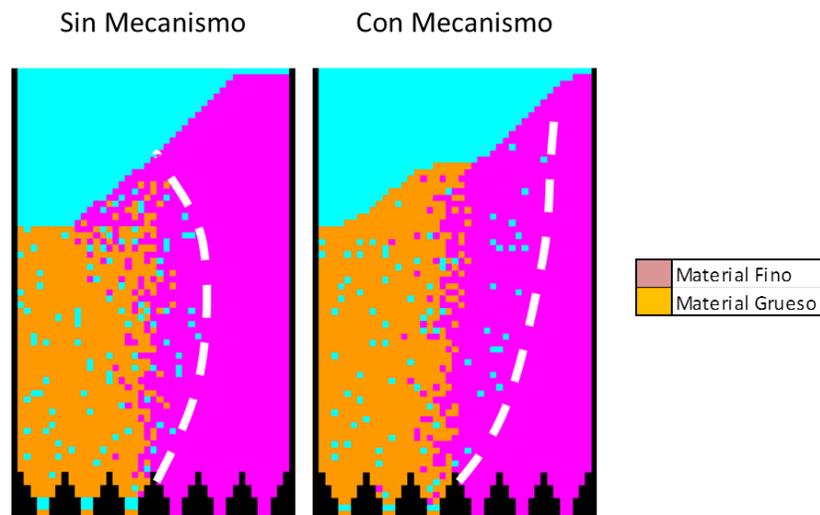


Figura 29: Simulación en FlowSim sin y con flujo preferencial (Caso Vertical).

La comparación visual de la Figura 29 da a entender que bajo las mismas condiciones de extracción y cuando se considera el mecanismo de flujo preferencial, los vacíos tienden a moverse hacia la zona de menor calidad de roca (material fino). Esta tendencia es marcada con una línea blanca en la figura para una mejor observación.

Para el estudio de ingreso de dilución al punto, se decide analizar el tercer punto de extracción, el cual se encuentra justo al lado izquierdo de la interfaz, en la zona de alta calidad (material grueso). La Figura 30 presenta el análisis de dilución acumulada del punto a medida que la extracción evoluciona para ambas simulaciones (con y sin mecanismo). En el gráfico se observa

que hay una entrada temprana de dilución cuando se considera el mecanismo. La dilución acumulada para esta simulación aumenta rápida e intensivamente con respecto a la simulación en donde no se considera el flujo preferencial.

La tendencia del flujo hacia las zonas de menor calidad y la entrada temprana de dilución confirman cualitativamente la buena implementación del flujo preferencial en FlowSim 1.0.

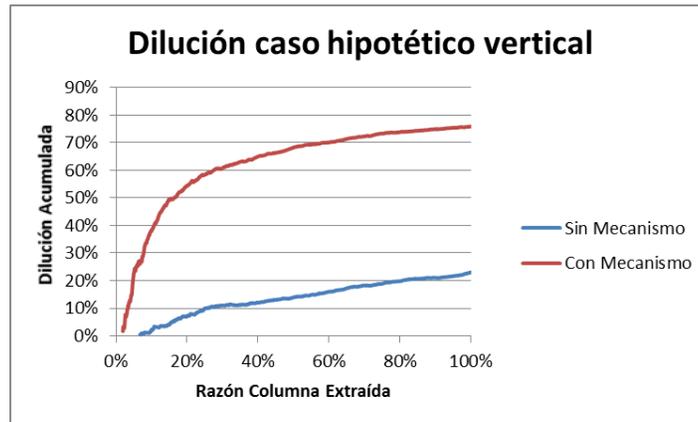


Figura 30: Dilución acumulada con y sin mecanismo de flujo preferencial para el Caso Vertical.

#### 4.3.2. Caso horizontal

Al igual que para el Caso Vertical, para el Caso Horizontal se llevan a cabo las comparaciones de las dos simulaciones realizadas, una sin considerar el mecanismo de flujo preferencial ( $M = 0$ ) y la otra considerando el mecanismo ( $M = 2$ ).

Para una misma cantidad de material extraído, se presenta la columna de extracción y el comportamiento del flujo (Figura 31). La comparación visual de la Figura 31 da a entender que bajo las mismas condiciones de extracción y cuando se considera el mecanismo de flujo preferencial, el material fino tiende a bajar con una mayor rapidez debido a la mayor probabilidad de ser elegido por el vacío. Esta tendencia es marcada con una línea blanca en la figura para una mejor observación.

A continuación, se presenta en la Figura 32 el análisis de dilución acumulada para uno de los puntos a medida que la extracción evoluciona para ambas simulaciones (con y sin mecanismo). Al igual que en el caso vertical, para el caso horizontal se observa que hay una entrada temprana de dilución cuando se considera el mecanismo. La dilución acumulada para esta simulación aumenta rápida e intensivamente con respecto a la simulación en donde no se considera el flujo preferencial.

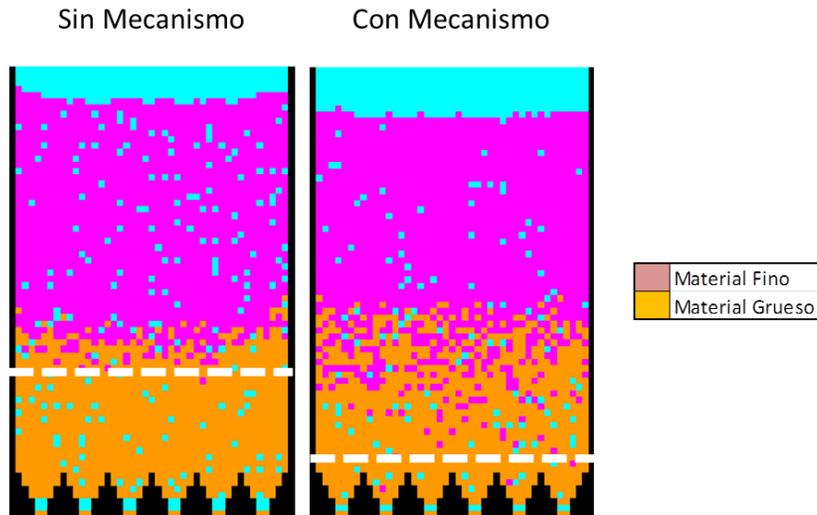


Figura 31: Simulación en FlowSim sin y con flujo preferencial (Caso Horizontal).

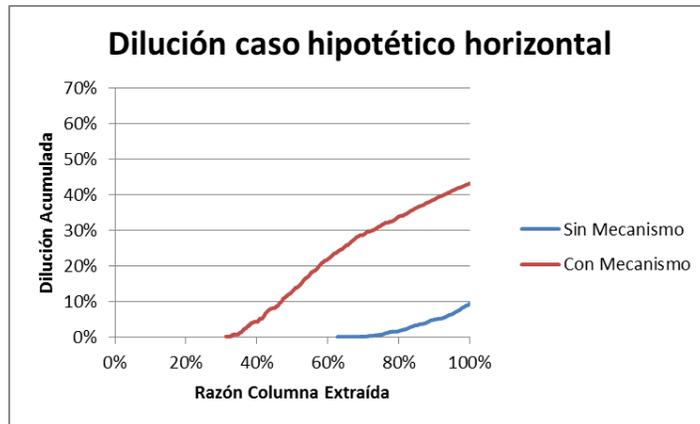


Figura 32: Dilución acumulada con y sin mecanismo de flujo preferencial para el Caso Horizontal.

El avance rápido de los finos hacia los puntos de extracción y la entrada temprana de dilución confirman la buena implementación del flujo preferencial en FlowSim 1.0.

#### 4.4. Simulaciones tiraje aislado

A continuación, se realizan simulaciones con FlowSim 1.0 (versión Matlab) y el mecanismo de flujo preferencial implementado. El objetivo de esta sección es realizar simulaciones de tiraje aislado variando las constantes de ajustes, de esta manera poder analizar los resultados obtenidos y observar el efecto que producen estas variaciones. Para lo anterior, se construye una mina virtual con altura de columna de mineral de 240 [m] (material grueso) y sobre esta columna se encuentra el material estéril (dilución fina). Se realiza extracción total para cada simulación de 1 Mton (100% de la extracción) con el fin de observar la evolución de la dilución posterior al

primer ingreso. Por último, el tamaño de los bloques es de  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  con una densidad de  $1,6 \text{ t/m}^3$ .

#### 4.4.1. Variando parámetro N

Para este estudio, se realizan cuatro simulaciones variando el parámetro N, manteniendo constante el parámetro cV ( $cV=4$ ) y sin considerar el efecto del flujo preferencial ( $M=0$ ). El valor de N para las cuatro simulaciones es 0, 2, 5 y 8.

La Figura 33 contiene el resultado de la evolución de la dilución acumulada a lo largo de la extracción para cada una de las cuatro simulaciones. Se observa que cuando N es igual a 8, la dilución comienza a ingresar a los puntos al 20% de la extracción aproximadamente, por el contrario, cuando N equivale a 0, la dilución hace ingreso al 75% de la extracción. A medida que el valor de N disminuye, el ingreso de dilución es cada vez más tardío. Ahora, al analizar las pendientes de las curvas de dilución acumulada se observa que a medida que el valor de N disminuye, la pendiente de la curva también lo hace, es decir, la cantidad de dilución extraída por unidad de mineral disminuye.

Por lo anterior, se determina que a medida que el parámetro N aumenta, ingresa mayor cantidad de dilución a los puntos de extracción y de manera más temprana.

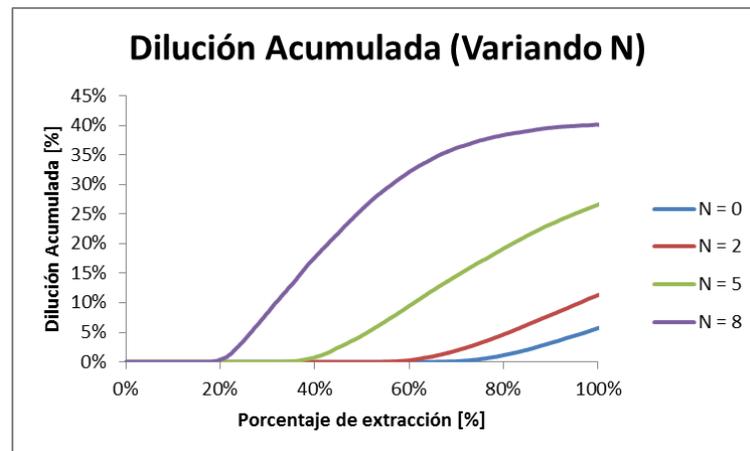


Figura 33: Resultados de dilución acumulada para variaciones del parámetro N.

FlowSim 1.0 tiene la capacidad de generar vistas del elipsoide de extracción y un análisis de las dimensiones de este elipsoide a lo largo de la extracción. A continuación se presenta la evolución del elipsoide de extracción para cada una de las simulaciones (Figura 34), en donde el análisis para el ancho del elipsoide se corta cuando el alto del mismo elipsoide alcanza el nivel superior de la columna de mineral (240 metros o 120 celdas). Esto es debido a que cuando se alcanza el nivel superior, la elipsoide no evoluciona normalmente por efecto de los límites de la mina virtual y por lo tanto el ancho se distorsiona.

En la Figura 34 se observa que para la simulación que posee el mayor valor de N ( $N = 8$ ), su elipsoide de extracción es la primera en alcanzar el nivel superior de la columna de mineral y

además es la más angosta (elipsoide esbelta). A medida que el parámetro N disminuye, la elipsoide de extracción es más ancha y por consecuencia debe ser menos alargada para representar una cantidad equivalente de material extraído. Recordar que el fino se encuentra sobre el nivel superior de la columna de mineral. Por lo tanto, la elipsoide de extracción al ser más ancha y menos alargada (elipsoide menos esbelta), alcanza la altura del fino mucho después, en otras palabras, el fino entra al punto de extracción más tardíamente. Es el caso para la simulación donde el valor de N es el menor ( $N = 0$ ) y su elipsoide es la que tarda más en alcanzar el nivel superior, como también la que posee el ingreso de dilución más tardío dentro de las simulaciones donde se varía N.

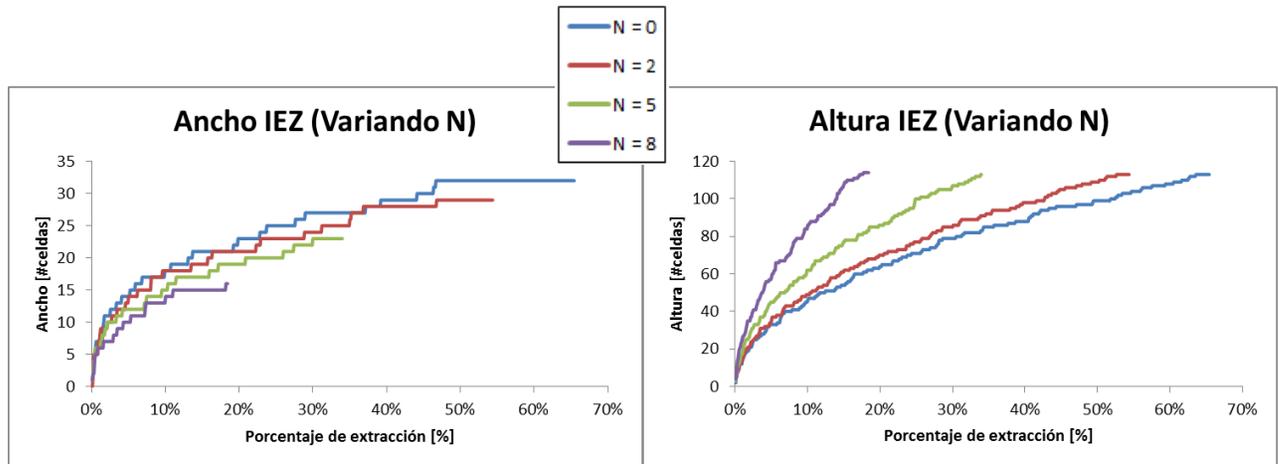


Figura 34: Dimensiones de elipsoide de extracción para simulaciones variando N.

En el análisis de sensibilidad para el parámetro N, se obtuvo que cuando N alcanza su valor mínimo ( $N = 0$ ), las probabilidades de los bloques son equivalentes. Se genera una capacidad de ascenso del vacío igualitaria en todas las direcciones. En esta situación los bloques esquina y lateral alcanzan su mayor probabilidad de ser escogidos, por lo tanto, la elipsoide de extracción generada por Flowsim tendrá el ancho máximo posible.

Por el contrario, a medida que N crece, la probabilidad del bloque central aumenta debido a su menor distancia, además la probabilidad de los bloques laterales y de esquinas disminuye. Lo anterior ocasiona que si se tiene un N muy alto, por ejemplo  $N = 8$ , se forma una elipsoide de extracción delgada. En este caso la probabilidad del bloque central es muy alta comparada con los bloques laterales y esquinas, por lo que el vacío tiene muy pocas oportunidades de ascender “diagonal o lateralmente” y de esta manera la elipsoide no puede crecer hacia los lados.

La Figura 35 muestra cuán esbelta (angosta y alargada) es la elipsoide a medida que el valor de N varía para una misma cantidad de masa extraída. Básicamente se verifica lo explicado, a medida que N aumenta la elipsoide es más alargada y angosta (más esbelta), lo que provoca la entrada de dilución en el punto de extracción de manera más temprana.

Según Laubscher (1994), fragmentos pequeños producen zonas de movimiento más angostas y estos fragmentos tienen asociado un RMR menor. Por lo anterior, se sugiere al usuario utilizar altos valores de N en columnas de mineral que presenten una baja calidad de macizo rocoso o que presenten pequeños fragmentos de manera de obtener elipsoides de menor diámetro. De igual forma, se sugiere al usuario utilizar bajos valores de N para obtener elipsoides anchos en macizos

de alta calidad o que presenten fragmentos grandes, ya que provocan zonas de movimiento de mayor diámetro.

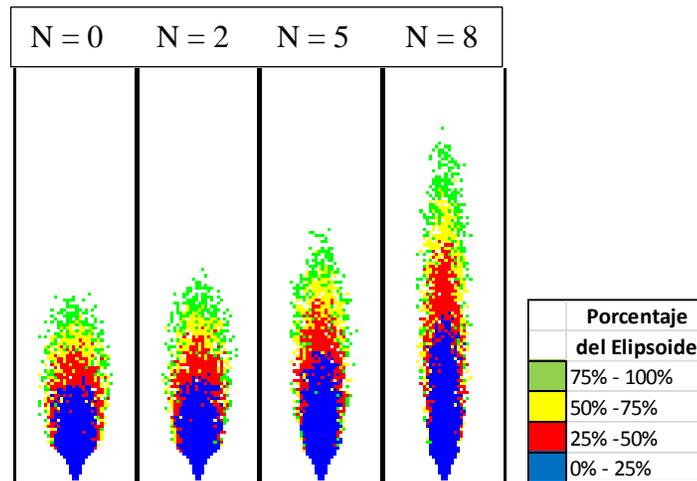


Figura 35: Elipsoide de extracción para simulaciones variando N (10% de extracción;  $cV = 4$ ).

#### 4.4.2. Variando parámetro $cV$

Para este estudio, se realizan cuatro simulaciones variando el parámetro  $cV$ , manteniendo constante el parámetro N ( $N = 3,4$ ) y sin considerar el efecto del flujo preferencial ( $M = 0$ ). El valor de  $cV$  para las cuatro simulaciones es 1, 3, 5 y 7.

La Figura 36 contiene el resultado de la evolución de la dilución acumulada a lo largo de la extracción para cada una de las cuatro simulaciones. En esta ocasión, se observa que cuando  $cV$  es igual a 1, la dilución comienza a ingresar a los puntos al 30% de la extracción aproximadamente, por el contrario, cuando  $cV$  equivale a 7, la dilución hace ingreso al 75% de la extracción. A medida que el valor de  $cV$  aumenta, el ingreso de dilución es cada vez más tardío. Ahora, al analizar las pendientes de las curvas de dilución acumulada se observa que a medida que el valor de  $cV$  aumenta, la pendiente de la curva decrece, es decir, la cantidad de dilución extraída por unidad de mineral disminuye.

Por lo anterior, se determina que a medida que el parámetro  $cV$  aumenta, ingresa menor cantidad de dilución a los puntos de extracción y de manera más tardía.

La Figura 37 presenta la evolución del elipsoide de extracción para cada una de las cuatro simulaciones. Se observa que todas las elipsoides poseen prácticamente el mismo ancho, pero distintas alturas. Además, para la simulación que posee el menor valor de  $cV$  ( $cV = 1$ ), su elipsoide de extracción es la primera en alcanzar el nivel superior de la maqueta (mayor altura). Un mayor valor en la restricción  $cV$  significa que se requiere una mayor cantidad de vacíos para que el vacío en estudio cumpla con la condición impuesta y de esta manera ascender de nivel. Mayor cantidad de vacíos implica mayor extracción para generar nuevos vacíos (elipsoide más densa). Por lo tanto, si  $cV$  aumenta, se necesita mayor cantidad de extracción para que los vacíos alcancen el nivel superior, lo que retrasa la entrada de dilución. Es el caso donde el valor de  $cV$  es

el mayor ( $cV = 7$ ) y su elipsoide es la que tarda más en alcanzar el nivel superior, como también la que posee el ingreso de dilución más tardío dentro de las simulaciones donde se varía  $cV$ .

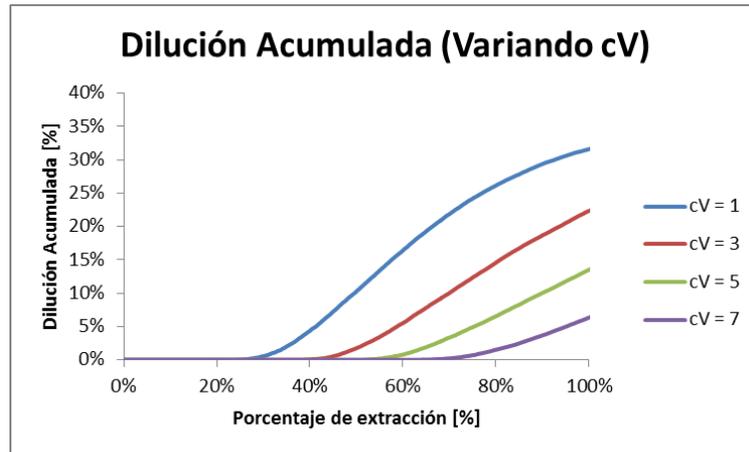


Figura 36: Resultados de dilución acumulada para simulaciones variando  $cV$ .

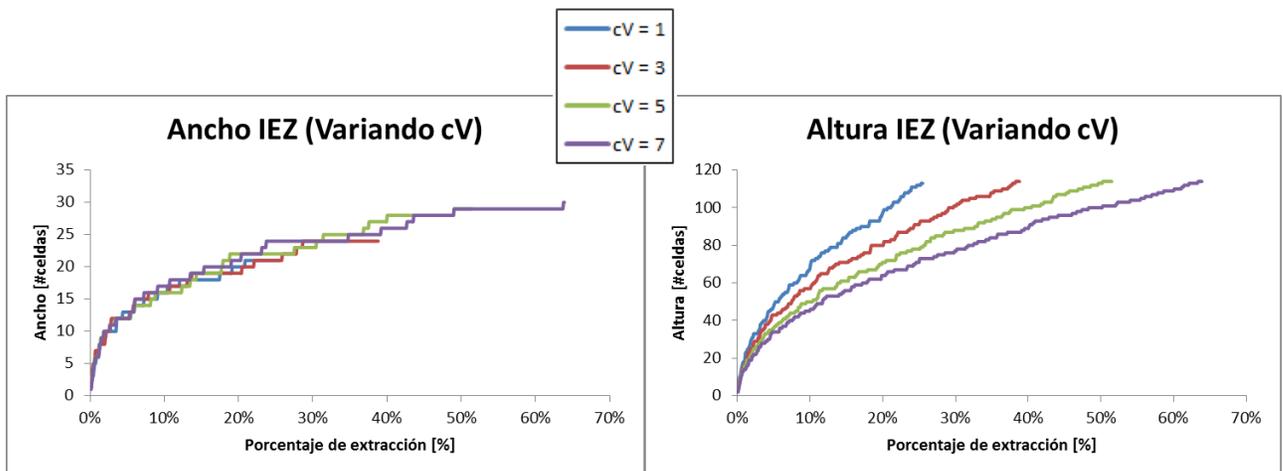


Figura 37: Dimensiones de elipsoide de extracción para simulaciones variando  $cV$ .

La Figura 38 muestra la forma del elipsoide a medida que el valor de  $cV$  varía para una misma cantidad de masa extraída. Básicamente se verifica lo explicado, a medida que  $cV$  aumenta la elipsoide es menos densa y además, el ancho de la elipsoide prácticamente no cambia. Una elipsoide menos densa es más alargada, lo que provoca la entrada de dilución en el punto de extracción de manera más temprana.

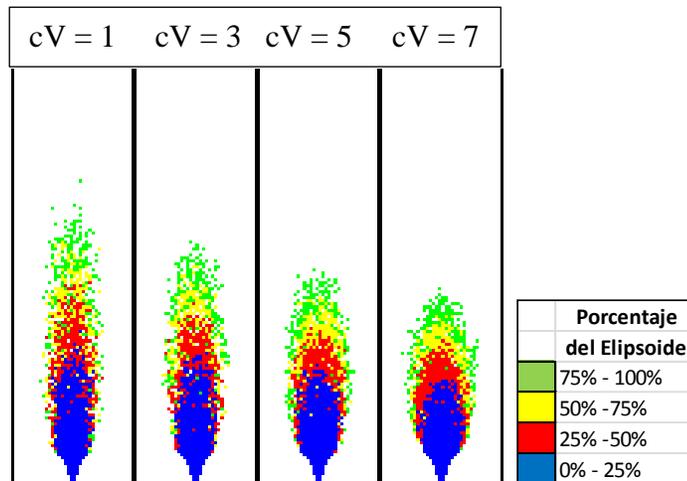


Figura 38: Elipsoide de extracción para simulaciones variando  $cV$  (10% de extracción;  $N=3,4$ ).

#### 4.4.3. Variando parámetro $M$

Para este estudio se considera el efecto del flujo preferencial, por lo que se realizan cuatro simulaciones variando el parámetro  $M$ , manteniendo constante el parámetro  $N$  ( $N = 3,4$ ) y el parámetro  $cV$  ( $M = 4$ ). El valor de  $M$  para las cuatro simulaciones es 0, 0,5, 1 y 1,5.

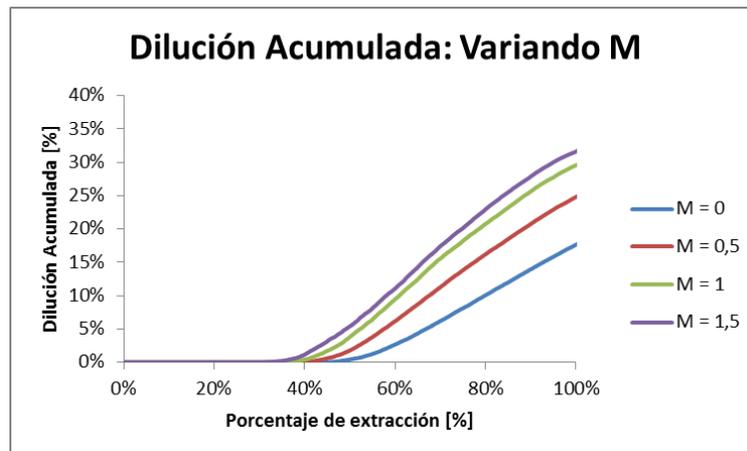


Figura 39: Resultados de dilución acumulada variando  $M$  (10% de extracción).

La Figura 39 contiene el resultado de la evolución de la dilución acumulada a lo largo de la extracción para cada una de las cuatro simulaciones. Se observa que cuando  $M$  es igual a 0, la dilución comienza a ingresar a los puntos al 50% de la extracción aproximadamente, por el contrario, cuando  $M$  equivale a 1,5, la dilución hace ingreso al 35% de la extracción. A medida que el valor de  $M$  aumenta, el ingreso de dilución es cada vez más temprano. Por otro lado, al analizar las pendientes de las curvas de dilución acumulada se observa que a medida que el valor de  $M$  aumenta, la pendiente de la curva también lo hace, es decir, la cantidad de dilución extraída por unidad de mineral crece.

Por lo anterior, se determina que a medida que el parámetro M aumenta, ingresa mayor cantidad de dilución a los puntos de extracción y de manera más temprana. Este efecto es justamente la lógica que intenta representar el mecanismo de flujo preferencial, es decir, otorgar mayor capacidad de movimiento a bloques que posean un menor RMR, en este caso se da preferencia de movimiento a la dilución fina, lo que provoca la entrada temprana de dilución.

El parámetro M indica una mayor o menor capacidad de movimiento de los bloques finos por sobre los gruesos. Por lo tanto, se sugiere al usuario utilizar un alto valor de M cuando hay una gran diferencia entre los tamaños del material fino y grueso presentes en la columna de mineral, ya que mientras mayor sea la diferencia en los tamaños, la teoría indica que el material fino tiene una mayor capacidad de movimiento (Armijo et al, 2014).

Finalmente, del estudio de tiraje aislado, se presenta un resumen del efecto de las constantes de ajustes en el resultado de las simulaciones (Tabla 6).

**Tabla 6: Efecto de las constantes de ajustes en el resultado de la simulación.**

<b>Constantes de Ajustes</b>	<b>Efecto en el resultado</b>	<b>Cómo utilizar</b>
<b>N</b>	A medida que el parámetro N aumenta, la zona de movimiento es más angosta (elipsoide esbelta). De esta forma, el elipsoide o las zonas de movimiento alcanzan niveles superiores con mayor rapidez.	Utilizar altos valores de N cuando hay una alta presencia de material fino (fragmentos pequeños) en la columna de mineral.
<b>cV</b>	A medida que el parámetro cV aumenta, el vacío posee una mayor restricción para ascender. Por lo tanto, bloques que se encuentran en niveles superiores tardan un tiempo mayor en ser extraídos.	Utilizar altos valores de cV si se desea retrasar la extracción de material que se encuentra en niveles superiores.
<b>M</b>	A medida que el parámetro M aumenta, la capacidad de movimiento del material fino aumenta con respecto al material grueso y la dilución también lo hará en la medida que el material fino sea estéril.	Utilizar altos valores de M cuando hay una gran diferencia entre los tamaños del material fino y el material grueso presentes en la columna de mineral.

#### 4.5. Comparación entre FlowSim 3.0 y metodología de Laubscher

En esta etapa se realizan simulaciones con FlowSim 3.0 (FlowSim 2.0 con mecanismo de flujo preferencial implementado). El objetivo es realizar extracción de tiraje uniforme variando el espaciamiento entre los puntos y el parámetro M para posteriormente estudiar los resultados y analizar los efectos de estas variaciones. En esta ocasión los resultados estarán basados en el PED al 0%, 3% y 5%. Por último, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos desde estas simulaciones y lo indicado en la metodología de Laubscher en el cálculo del PED según el espaciamiento de los puntos de extracción.

Para realizar este análisis, se define a continuación el tipo de malla (configuración de puntos de extracción) y la nomenclatura que se utilizará en las simulaciones de tiraje uniforme.

##### 4.5.1. Definición tipo malla y simulación

Se considera una distribución de puntos de extracción siguiendo una configuración de malla tipo Teniente. Además, la extracción se realiza a través de 18 puntos de extracción y de manera uniforme. En la Figura 40 se muestra esquemáticamente esta situación y donde se representa el largo de la zanja ( $Lz$ ), el espaciamiento entre puntos a través del pilar mayor ( $Ep$ ), la distancia entre calles de producción ( $Dc$ ), la distancia entre calles zanjas o estocadas de carguío ( $Dz$ ) y el ángulo que forma la intersección entre calles y zanjas ( $\alpha$ ) que generalmente es equivalente a  $60^\circ$ . Notar que en esta nomenclatura  $Dc$  se mide perpendicularmente entre dos calles de producción, mientras que  $Dz$  se mide paralela a la dirección de estas calles.

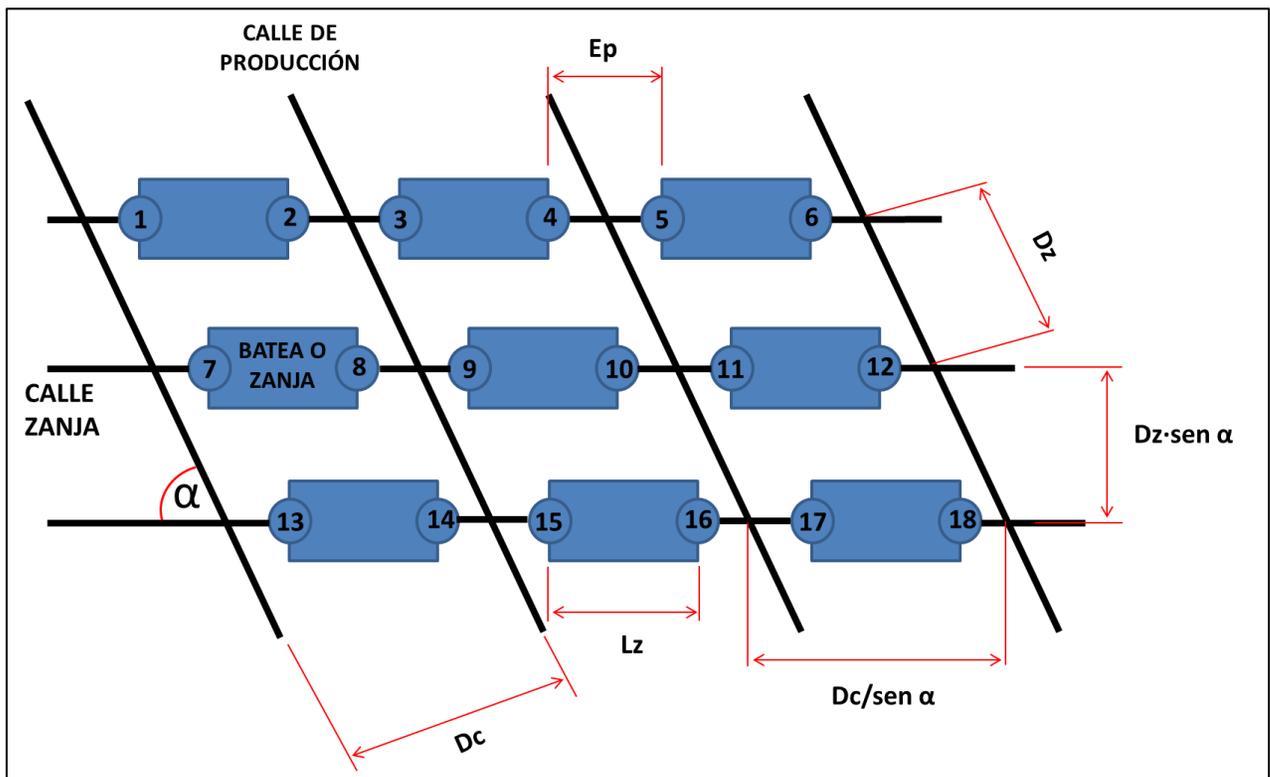


Figura 40: Representación malla regular tipo Teniente.

En el esquema anterior, se enumeran también los puntos de extracción del 1 al 18, en donde el punto 9 es seleccionado para analizar sus resultados, ya que se encuentra al centro del esquema y no es afectado por las condiciones de borde como sucede con los puntos a los costados.

Para la simulación, se diseña una mina virtual que posee una altura de columna de mineral (RMR=70; material grueso) equivalente a 200 metros y sobre esta columna se dispone de material fino (RMR=10; dilución). Además, se realizan simulaciones de tiraje uniforme para 3 configuraciones de malla diferentes con el objetivo de variar el espaciamiento entre los puntos (Ep) y son indicados en la Tabla 7. Cabe destacar que se considera un ángulo  $\alpha$  de 60°.

Tabla 7: Variación del espaciamiento entre puntos.

Tipo malla (Dz[m] x Dc[m])	Largo Batea [m] (Lz)	Espaciamiento [m] (Ep)
10 x 20	11	12
13 x 26	11	19
15 x 30	11	24

Finalmente, para cada tipo de malla o espaciamiento entre puntos se varía el valor del parámetro M del flujo preferencial, tomando los siguientes valores: 0; 0,5; 1 y 1,5. Mientras que, para los parámetro N y cV, se consideran los estudios hechos por Valencia (2014), donde obtuvo que para tiraje interactivo el valor es de 4,9 y 3 respectivamente.

#### 4.5.2. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de tiraje uniforme al variar el espaciamiento y el parámetro M y que fueron realizadas en FlowSim 3.0. La Tabla 8 indica los PED al 0%, 3% y 5% obtenidos de estas simulaciones. Al igual que en el caso de tiraje aislado, se observa que todos los PED disminuyen con el aumento del parámetro M, por lo que se sigue la lógica del flujo preferencial y se comprueba la correcta implementación de este mecanismo en FlowSim 3.0.

Tabla 8: Resultados tiraje uniforme variando espaciamiento y parámetro M.

Valor de M	Malla 10[m] x 20[m]			Malla 13[m] x 26[m]			Malla 15[m] x 30[m]		
	PED(0%)	PED(3%)	PED(5%)	PED(0%)	PED(3%)	PED(5%)	PED(0%)	PED(3%)	PED(5%)
0	99%	123%	127%	81%	101%	106%	69%	88%	92%
0,5	75%	99%	109%	67%	84%	89%	55%	73%	78%
1	66%	85%	90%	53%	70%	75%	46%	63%	67%
1,5	61%	75%	80%	47%	61%	67%	41%	55%	59%

Ahora, analizando el cambio de malla para un valor de M dado, resulta que a medida que la distancia entre puntos aumenta el PED disminuye. Por último, al comparar los PED al 0%, 3% y 5% para una configuración de puntos determinada, se observa que hay una gran diferencia en la razón de columna extraída entre el primer ingreso de dilución (PED 0%) y el momento en que el punto se considera diluido definido por el criterio de Paredes (2012) (PED (3%)). De los

resultados, se obtiene que la diferencia absoluta promedio entre el PED(0%) y el PED(3%) es de un 18% aproximadamente, por el contrario, al comparar el PED(3%) con el PED(5%) resulta que no existe una gran diferencia, la cual es equivalente a un 5%. Esta gran diferencia que se tiene de razón de columna extraída entre el momento del primer ingreso de dilución y cuando hay un 3% de dilución acumulada, indica que en esos instantes la entrada de dilución en el punto es lenta o intermitente. Mientras que la poca diferencia que se tiene de razón de columna extraída cuando hay un 3% de dilución acumulada y cuando hay un 5%, indica que la entrada de dilución es más rápida o continua. Por lo tanto, el criterio definido por Paredes (2012) para declarar un punto diluido a partir del PED(3%) se considera como correcto, ya que a partir de ese instante la dilución comienza a ingresar de manera mucho más abrupta.

A modo de comparación, se decide buscar alguna relación entre los resultados obtenidos en estas simulaciones y los que se obtendrían al acudir a la metodología de Laubscher, en cuanto a estimación del punto de entrada de dilución.

Según Laubscher (1994), el cálculo del PED se realiza mediante la Ecuación 4. En la Tabla 9 se definen los parámetros de cálculo que son necesarios para la ecuación. Entre otras cosas, se supone un factor de control de tiraje (DCF) igual a 1, que asemeja a condiciones ideales de tiraje uniforme, y se considera un factor de esponjamiento para una granulometría media (1,12).

**Tabla 9: Parámetros de cálculo de PED según metodología de Laubscher (1994).**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
RMR dilución (material fino)	10
RMR mineral (material grueso)	70
Factor control de tiraje (DCF)	1
Factor de esponjamiento	1,12
Altura de columna	200 [m]

Luego de considerar estos parámetros, se calcula el espaciamiento entre puntos a lo largo del pilar mayor ( $E_p$ ) para cada dimensión de malla de la Tabla 7. Después, se utiliza la Figura 9 junto con el RMR de los materiales presentes en la columna de mineral y el espaciamiento calculado para determinar la altura de interacción (HIZ). Luego, con HIZ se calcula el Punto de Entrada de Dilución según la metodología de Laubscher (1994) para cada tipo de malla y cuyos resultados se indican en la Tabla 10.

**Tabla 10: Cálculo del punto entrada de dilución según Laubscher (1994).**

<b>Tipo Malla (Dz[m] x Dc[m])</b>	<b>Espaciamiento (<math>E_p</math>) [m]</b>	<b>HIZ [m]</b>	<b>PED Laubscher (%)</b>
<b>10 x 20</b>	12	45	80%
<b>13 x 26</b>	19	83	63%
<b>15 x 30</b>	24	132	41%

Por último, se presentan en la Tabla 11 la comparación de los resultados obtenidos a través de la metodología Laubscher y los resultados obtenidos en cada simulación para cada tipo de malla.

Tabla 11: Comparación entre PED Laubscher y PED simulaciones.

Tipo Malla (Dz[m] x Dc[m])	Espaciamiento (Ep) [m]	PED(0%) Laubscher (%)	Simulaciones			
			M = 0 PED(0%)	M = 0,5 PED(0%)	M = 1 PED(0%)	M = 1,5 PED(0%)
10 x 20	12	80%	99%	75%	66%	61%
13 x 26	19	63%	81%	67%	53%	47%
15 x 30	24	41%	69%	55%	46%	41%

Al analizar los PED obtenidos a través de la metodología de Laubscher, se observa que a medida que el espaciamiento entre puntos aumenta el PED disminuye, es decir, el ingreso de dilución a los puntos de extracción se registra de manera más temprana. Esto se debe a que medida que el espaciamiento entre puntos aumenta, el solapamiento entre las zonas de movimiento de los puntos adyacentes es menor, por lo que la altura de interacción de estas zonas aumenta y la cantidad de material que se extrae para alcanzar el nivel superior es menor. Los PED de las simulaciones siguen la misma tendencia observada en los resultados de Laubscher, en otras palabras, el PED disminuye cuando el espaciamiento de los puntos aumenta.

Por otro lado, al calcular el PED a través de la metodología de Laubscher, se considera la presencia de material heterogéneo, es decir, presencia de diferentes materiales a lo largo de la columna de mineral. Esto conlleva a una diferencia de RMR, lo que produce un aumento en la HIZ obtenida desde la Figura 9 y que finaliza en una disminución del PED o en una entrada más temprana de dilución. En este mismo ámbito, los resultados de las simulaciones muestran que a medida que aumenta el parámetro M, en otras palabras, a medida que se otorga una mayor importancia a la diferencia de material, se obtiene un menor PED, por lo que se reproduce la tendencia observada en los resultados de Laubscher.

Por lo tanto, es posible afirmar que FlowSim 3.0 permite reproducir de manera consistente las hipótesis realizadas por Laubscher en cuanto a la tendencia de los resultados que produce variar el espaciamiento entre puntos y la heterogeneidad de material de la columna de extracción en la entrada de dilución de los puntos.

#### 4.6. Simulaciones FlowSim 3.0 a nivel industrial

De manera de avanzar en el estudio del mecanismo de flujo preferencial implementado en FlowSim 3.0, se recolecta información de extracción de alguna mina (en este caso ICE) con el fin de verificar y analizar el correcto funcionamiento del simulador con un volumen de datos real a nivel industrial.

El análisis se realiza comparando resultados simulados versus los resultados obtenidos en el sector Inca Central Este de la Mina El Salvador y se llevan a cabo en dos ámbitos. Primero, se compara la capacidad predictiva del simulador en términos de tonelaje, ley, dilución acumulada y entrada de dilución (fecha) a nivel global del sector, y luego en términos de punto entrada de dilución (PED(3%)) a nivel de puntos de extracción.

Para llevar a cabo las simulaciones se mantienen constantes los valores de los parámetros N y cV y se varía el parámetro del flujo preferencial M. Para lo anterior, se considera los estudios hechos por Valencia (2014), donde obtuvo que para tiraje interactivo el valor de las constantes de ajustes N y cV son 4,9 y 3 respectivamente. Mientras tanto, la constante de ajuste M del flujo preferencial se varía entre 0 y 1.

##### 4.6.1. Herramientas comparativas

Para realizar comparaciones entre diversos resultados, se utilizan herramientas estadísticas y/o matemáticas para cuantificar cuán similares son. Las herramientas comparativas que se utilizan en este estudio son las siguientes.

##### i. Error cuadrático medio

Para el cálculo de la precisión con la cual la variable simulada estima la variable observada (dato experimental), se introduce el error cuadrático medio (Pielke, 2002). Se abrevia RMSE derivado de sus siglas en inglés, el cual posee la misma unidad de medida que la variable estudiada.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(V_{sim} - V_{obs})^2}{N}}$$

Ecuación 8: Error cuadrático medio.

Donde:  $V_{sim}$ =Valor simulado     $V_{obs}$ =Valor observado (experimental)    N=Número de datos

ii. Error relativo medio

Debido a que el RMSE posee la misma unidad de medida que la variable estudiada, es necesario definir un nuevo índice. Un índice construido en términos relativos, de manera de observar el comportamiento relativo de la variable simulada con respecto a la variable observada (experimental). De esta forma el error relativo medio se define como:

$$\text{Error relativo medio (\%)} = \frac{RMSE}{\sum_{i=1}^N \frac{V_{obs}}{N_{obs}}}$$

**Ecuación 9: Error relativo medio.**

Con  $N_{obs}$ =Número de datos observados (experimentales)

iii. Confiabilidad

De manera de cuantificar la precisión de las simulaciones de flujo realizadas con respecto a la entrada de dilución a nivel de puntos de extracción, se define la confiabilidad como la capacidad de una simulación de reproducir la entrada (o no entrada) de un marcador geológico (en este caso dilución) determinado a nivel de puntos de extracción en un sector de la siguiente forma:

$$\text{Confiabilidad(\%)} = \frac{S + B}{2} \cdot 100$$

**Ecuación 10: Definición de Confiabilidad.**

Donde S es el cuociente entre el número de puntos con entrada de marcador geológico declarado tanto en datos mina como en la simulación y el número de puntos con entrada de marcador geológico declarado en datos mina. En tanto, B corresponde al cuociente entre el número de puntos sin entrada de marcador geológico declarado tanto en datos mina como en la simulación y el número de puntos sin entrada de marcador geológico declarado en datos mina.

#### 4.6.1. Resultados y análisis

La Tabla 12 muestra un resumen de los resultados que se obtienen de las simulaciones hechas para el sector Inca Central Este de la mina El Salvador de Codelco. Estos resultados se pueden ver en detalle en el Anexo B del presente trabajo.

Tabla 12: Resumen de resultados de simulaciones para sector ICE.

Sector Inca Central Este (ICE)	Datos Mina		Simulaciones			
<b>Tonelaje a escala de plan de producción de sector</b>	Tonelaje medio extraído (kt, mensual)	60,5 ± 51,5	Valor M	RMSE (kt)	Error relativo medio mensual (%)	
			0	0,43	0,71	
			0,3	0,42	0,69	
			0,5	0,42	0,70	
			0,8	0,43	0,71	
			1	0,42	0,69	
<b>Leyes de Cu a escala de plan de producción de sector</b>	Leyes de Cu media extraída (% , mensual)	0,56% ± 0,09%	Valor M	RMSE (%)	Error relativo medio mensual (%)	
			0	0,11	20	
			0,3	0,10	18	
			0,5	0,09	16	
			0,8	0,08	14	
			1	0,07	13	
<b>Entrada de dilución a escala de plan de producción de sector (fecha)</b>	Octubre, 2003 (Oct-03)		Valor M	Período entrada dilución	Diferencia en periodos	
			0	Ago-03	-2	
			0,3	Ago-03	-2	
			0,5	Ago-03	-2	
			0,8	Jul-03	-3	
			1	Jul-03	-3	
<b>Dilución acumulada a escala de plan de producción de sector</b>	Dilución Total [kt]	508 kt (25%)	Valor M	RMSE (%)	Error relativo medio (%)	
			0	3	33	
			0,3	1,1	12	
			0,5	2,5	28	
			0,8	5,9	65	
			1	8,3	92	
<b>Punto entrada de dilución a escala de puntos de extracción</b>	PED (3%) medio	55% ± 36%	Valor M	Confiability (%)	RMSE (%)	PED medio (3%)
			0	79	65	89 ± 29
			0,3	82	52	74 ± 24
			0,5	81	48	67 ± 23
			0,8	75	43	55 ± 19
			1	74	42	49 ± 17

De la Tabla 12 y el detalle de resultados registrados en Anexo B del presente trabajo se comenta lo siguiente:

Para los resultados de cantidad de material extraído a escala de producción de sector, se observa que a medida que el parámetro M aumenta, la cantidad de material extraído sigue siendo el

mismo, lo que es correcto, ya que M debe tener efecto sólo en los registros de dilución (considerando que el material fino es estéril). Por otro lado, las simulaciones se adecuan perfectamente a la carta de producción de la mina debido a que el error relativo medio que presentan es ínfimo (menor al 1%).

Al estudiar la entrada de dilución obtenidas en las simulaciones a escala de sector, se observa que ingresa de forma más anticipada a medida que el parámetro M aumenta. Además, el ingreso ocurre entre 2 a 3 meses más temprano que en el caso mina.

Ahora, al analizar la dilución acumulada obtenida en las simulaciones a escala de sector, se observa que estas curvas difieren de los datos mina entre un 12% a un 92% de error relativo medio. A medida que M aumenta, la curva de dilución acumulada también lo hace, es decir la dilución ingresa de manera más anticipada y más rápida a los puntos de extracción. El resultado de la simulación que mejor representa la dilución acumulada a escala sector es aquella que posee un M equivalente a 0,3 debido a que posee el mínimo error relativo medio (12%), lo que es considerado aceptable para proyectos en etapas de prefactibilidad en donde se tienen errores cercanos al 15%-20% de estimación.

Al analizar las leyes de cobre a escala de sector, se tiene que a medida que aumenta el parámetro M la ley de cobre que se obtiene es menor. Esto se debe a que al aumentar el valor de M, los bloques con bajo RMR (dilución fina) poseen una mayor capacidad de movimiento, por lo que ingresa una mayor cantidad de dilución y de manera más temprana a los puntos, provocando una disminución de la cantidad de cobre que se extrae. En términos de resultados, todas las simulaciones poseen un error relativo medio mensual entre un 13% a un 20%. Al igual que en el caso de dilución acumulada, estos valores se consideran aceptables para proyectos en etapas de prefactibilidad.

En términos de la reproducción del punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción, se observa que a medida que el parámetro M aumenta, la cantidad de puntos que son declarados como diluidos en la simulación también aumenta (sobrestimación de puntos diluidos) y el PED medio disminuye debido al ingreso más temprano y rápido de la dilución. En términos de resultados comparativos, el índice de confiabilidad de las simulaciones se encuentran entre un 74% a un 82%, valores que resultan relativamente altos y confiables en el ámbito de predicción de la cantidad de puntos diluidos y no diluidos (buena predicción cualitativa). Sin embargo, el PED medio de las simulaciones difiere en gran medida del PED medio del caso mina. Esto provoca un alto error en el índice RMSE (pobre predicción cuantitativa).

Siguiendo en la línea de la reproducción del PED a escala de puntos de extracción, el alto error en el índice RMSE se debe a que FlowSim 3.0 no es capaz de reproducir el pilar de roca quebrada que se forma sobre los puntos inactivos y que impide el paso de material diluyente hacia la zona sur del sector ICE. Los resultados de FlowSim muestran una gran cantidad de puntos diluidos en esta zona. En este mismo contexto, tampoco se observa la tendencia de una entrada más temprana de dilución en los puntos ubicados en la parte central producto de la dilución lateral propuesta por Paredes (2012), por lo que el simulador no es capaz de reproducir este proceso.

A continuación, se muestra un resumen de la simulación de FlowSim 3.0 que obtuvo resultados más cercanos a la extracción en ICE. Además, se realiza una comparación frente a resultados obtenidos a través de otro simulador de flujo gravitacional (REBOP) (Tabla 13).

Tabla 13: Comparación simulación de ICE en FlowSim 3.0 vs REBOP (Paredes, 2012)

Parámetro	FlowSim 3.0 (M = 0,3)	REBOP (frag. fina)
RMSE del PED	52%	59%
Confiabilidad del PED	82%	77%
Error relativo medio mensual de ley Cu	18%	18%
Entrada de dilución en el plan de producción (dif entre períodos)	-2	-1
Tiempo de simulación	~2 hrs	> 8 hrs

Los resultados simulados en REBOP son obtenidos a partir del trabajo realizado por Paredes (2012). En este caso, se observa que la simulación que representa con menor error la extracción obtenida en ICE es la que se lleva a cabo en FlowSim 3.0, aunque es una diferencia muy leve. Se destaca una mayor diferencia en los tiempos de simulación, donde las simulaciones del sector ICE en FlowSim 3.0 tardaron aproximadamente 2 horas, mientras que en REBOP las simulaciones tardaron un tiempo mayor a 8 horas (Paredes, 2012). Así, una de las ventajas del uso de FlowSim 3.0 como herramienta en la industria minera son sus menores tiempos de simulación.

Cabe destacar que en el trabajo realizado por Paredes (2012) hizo notar que REBOP no es capaz de representar las singularidades de algunas situaciones (pilar barrera y dilución lateral), al igual que FlowSim 3.0.

#### 4.7. Conclusiones del capítulo

El algoritmo de FlowSim sin considerar flujo preferencial realiza el cálculo de la curva de probabilidad para ascenso de vacíos una sola vez durante la simulación. Sin embargo, el nuevo algoritmo, el cuál considera el mecanismo de flujo preferencial, realiza el cálculo de la curva de probabilidad cada vez que un vacío cumpla la restricción de ascenso. Esto genera un aumento en la cantidad de procesos a llevar a cabo en la simulación y por lo tanto, un posible aumento en los tiempos de simulación. Estos aumentos en tiempos no se pueden medir o determinar debido a que a medida que se implementaba el mecanismo, el algoritmo de FlowSim 3.0 se iba depurando.

Es posible relacionar la lógica del mecanismo de flujo preferencial con el proceso de migración de finos, por esta razón se agrega el fino y grueso como nuevos estados para FlowSim 3.0, los cuales poseen las mismas características que el ahora antiguo estado granular. La diferencia entre el estado fino y grueso se encuentra en el valor del RMR, en donde se define para el material grueso un RMR de 70 y para el material fino un RMR de 10.

El análisis de sensibilidad permite encontrar el rango permisible de valores para las diferentes constantes de ajustes y de alguna manera ayudar al usuario de FlowSim en el proceso de simulación al momento de escoger qué valores utilizar. Se determina que N puede variar entre 0 a 12, M entre 0 a 3 y cV puede variar entre 1 a 8. Además, se concluye que no es relevante el valor que posea el RMR para el fino o para el grueso, debido a que el parámetro M es la constante de

ajuste que atribuye una mayor o una menor probabilidad al variar su valor según sea el caso. Lo único relevante es que el valor del RMR del material fino debe ser menor que el valor del RMR del material grueso para producir el efecto de preferencia de movimiento de los bloques finos en el flujo preferencial.

Del estudio de los casos hipotéticos, el flujo de la simulación, que considera flujo preferencial, tiene una clara tendencia a moverse hacia zonas de menor calidad de roca. Además, la dilución (material fino) entra tempranamente en el punto con respecto a la simulación que no considera flujo preferencial. Por esta razón se determina que el algoritmo de flujo preferencial es implementado de manera exitosa en FlowSim 1.0 (versión Matlab).

De los resultados de las simulaciones de tiraje aislado en FlowSim 1.0, se realizan las siguientes conclusiones para cada una de las constantes de ajustes.

- A medida que  $N$  aumenta, el PED disminuye. Además, la zona de movimiento es más angosta (elipsoide esbelta), de esta forma, el elipsoide o las zonas de movimiento alcanzan niveles superiores con mayor rapidez. Debido a las observaciones hechas por Laubscher, se sugiere al usuario utilizar en las simulaciones bajos valores de  $N$  cuando hay presencia de fragmentos pequeños en la columna de mineral.
- A medida que  $cV$  aumenta, el PED aumenta. Además, el vacío posee una mayor restricción para ascender, por lo tanto, bloques que se encuentran en niveles superiores tardan un tiempo mayor en ser extraídos. Se sugiere al usuario utilizar altos valores de  $cV$  si se desea retrasar la extracción de material que se encuentra en niveles superiores.
- A medida que  $M$  aumenta, hay una mayor capacidad de movimiento por el material de baja calidad (material fino) con respecto al material de alta calidad (material grueso). En este caso el material de baja calidad es considerado estéril, por lo que a medida que  $M$  aumenta el PED disminuye. Se sugiere al usuario utilizar altos valores de  $M$  cuando hay una gran diferencia entre los tamaños del material fino y el material grueso presentes en la columna de mineral.
- Un mayor PED significa que la entrada de dilución en el punto de extracción se retrasa, es decir, es necesario extraer mucho más material para observar ingreso de dilución.

La implementación del flujo preferencial en FlowSim 3.0 permite reproducir de manera consistente las hipótesis realizadas por Laubscher tanto en el efecto que produce el espaciamiento entre puntos de extracción en el ingreso de dilución como en el efecto que produce la heterogeneidad de material presente en la columna de mineral en el mismo ingreso de dilución. Además se confirma el criterio del PED ( $X\%$ ) como una correcta forma de declarar un punto diluido y prevenir las entradas de dilución en forma de pulsos. También, los resultados de las simulaciones realizadas en FlowSim 3.0 permiten determinar que el algoritmo de flujo preferencial es implementado de manera exitosa debido a que al aumentar el valor de  $M$ , se obtiene un mayor ingreso de dilución (material fino) en los puntos y de manera más temprana.

Los resultados de las simulaciones realizadas por FlowSim 3.0 para el caso de estudio del sector Inca Central Este, muestran que el simulador podría poseer el potencial de ser utilizado como una herramienta de planificación a largo plazo y a escala de plan de producción de sector debido a que es capaz de representar, con errores de estimación aceptables para proyectos en etapa de

prefactibilidad, la ley de cobre mensual, el tonelaje de material extraído, la entrada de dilución a nivel global y la dilución acumulada. Por otro lado, los resultados de punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción, muestran que FlowSim 3.0 no es capaz de representar a nivel cuantitativo el PED obtenido en el caso mina, debido a que los errores asociados (RMSE) son muy elevados. Aunque también, los resultados indican que sí es capaz de representar la cantidad de puntos que se encuentran diluidos y no diluidos (nivel cualitativo) debido al índice de confiabilidad aceptable que presentan. El alto índice de error se debe a que FlowSim 3.0 no es capaz de reproducir las singularidades del sector ICE, como por ejemplo, el pilar barrera que se forma sobre los puntos inactivos y que impide el paso de material diluyente hacia la zona sur, o como el movimiento lateral de la dilución que produce una entrada temprana de dilución en los puntos de la zona central. Sin embargo, aún falta llevar a cabo el proceso de calibración y validación de FlowSim 3.0, por lo que estos resultados no son concluyentes o determinantes.

Lo que sí es concluyente es que a medida que aumenta el parámetro M, los resultados de las simulaciones realizadas para el sector ICE muestran una mayor capacidad de movimiento de bloques que poseen menor RMR (dilución) por sobre los bloques con alto RMR (mineral). En otras palabras, se obtiene un mayor ingreso de dilución en los puntos y de manera más temprana, por lo que el mecanismo de flujo preferencial implementado en FlowSim 3.0 funciona de manera correcta con un volumen de datos a nivel industrial. Además, las simulaciones presentan tiempos de simulaciones menores con respecto a otros simuladores de flujo gravitacional, alrededor de un 80% menor. De esta forma, se entregan resultados con mayor rapidez y se confirma que una de las ventajas del uso de FlowSim 3.0 como herramienta en la industria minera son sus cortos tiempos de simulación.

Para el caso a nivel industrial, cabe destacar que, cuando no se considera flujo preferencial ( $M=0$ ), los resultados poseen errores mayores que cuando se considera un M mayor que 0 (activación del mecanismo), por lo tanto, el mecanismo de flujo preferencial ayudaría a obtener mejores resultados en el sentido que mejora la capacidad de predicción del ingreso de dilución a nivel de plan de producción de sector. Pero dicho anteriormente, es necesario confirmar con un proceso de calibración y validación.

FlowSim 3.0 frente a otros simuladores de flujo gravitacional entrega resultados levemente más representativos pero con tiempos de simulación notoriamente más bajos. Así, una de las ventajas del uso de FlowSim 3.0 como herramienta en la industria minera son sus menores tiempos de simulación.

## 5. PROPUESTA ALGORITMO COLGADURAS

En esta sección se presenta la propuesta de algoritmo para la predicción de colgaduras. El algoritmo es elaborado con la finalidad de realizar un pronóstico en un plan de producción sobre el número de eventos de colgadura que pueden aparecer.

### 5.1. Estudio y definición de principales parámetros

De la revisión bibliográfica realizada en el presente trabajo, se concluye que las principales variables que inciden en la formación de colgaduras son la sobrecarga vertical de la pila fragmentada ( $\sigma_z$ ) y la razón entre la abertura de batea (D) y el diámetro medio de fragmentos ( $d_m$ ).

Para el algoritmo de predicción de colgaduras se utilizarán las curvas obtenidas por Gómez (2014) y que fueron analizadas anteriormente (Figura 18). Las curvas entregan el tonelaje que pasa entre colgaduras (Hg) en un punto de extracción dado. Este valor es el que se requiere utilizar en el algoritmo a elaborar.

Para obtener el tonelaje entre colgaduras (Hg) que se obtiene de las curvas de Gómez (2014), se debe conocer la sobrecarga generada por la pila fragmentada ( $\sigma_z$ ) y la razón  $D/d_m$ . Cada curva representa un valor determinado de la razón  $D/d_m$  y abarca todos los posibles valores de la carga vertical. Gómez (2014) sólo ha obtenido dos curvas, por lo que se puede obtener el valor de Hg sólo para dos valores de la razón  $D/d_m$ . Producto de lo anterior, se propone que cada curva represente un determinado rango de valores de la razón  $D/d_m$ . Para abarcar todos los rangos posibles de valores, se recomienda realizar una mayor cantidad de experimentos de flujo confinado con granulometrías distintas y de esta manera construir nuevas curvas con distintos valores de  $D/d_m$  (replicando el trabajo realizado por Gómez).

A modo de ejemplo, se presentan tres curvas hipotéticas o ficticias. Cada curva indica el tonelaje entre colgaduras para un cierto rango de valores de la razón  $D/d_m$ . Cabe destacar que la construcción de las curvas para cada rango de valores se encuentra fuera del alcance de este trabajo, pero se asume que se llevará a cabo en otros estudios. Por lo tanto, para la elaboración del algoritmo de predicción de colgaduras se consideran estas curvas ficticias.

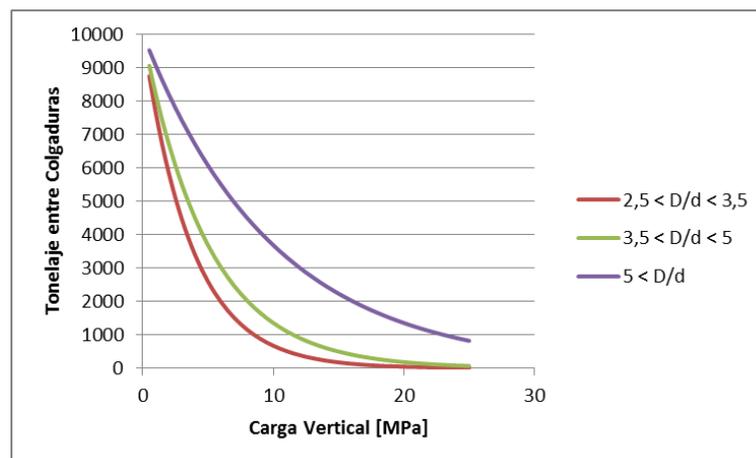


Figura 41: Modelo de estimación de frecuencias de colgaduras (curvas hipotéticas).

### 5.1.1. Razón entre la abertura mínima de batea y tamaño medio de fragmentos.

Con la implementación del flujo preferencial en FlowSim como nuevo mecanismo, se tienen dos estados que representan el movimiento del material en el flujo.

- Estado grueso: Representa los fragmentos con granulometría gruesa y posee RMR 70.
- Estado fino: Representa los fragmentos con granulometría fina y posee un RMR 10.

Para la presente propuesta es necesario asignar un valor representativo de tamaño a cada estado ( $d_i$ ). Por lo anterior, es necesario obtener una curva de fragmentación primaria para los gruesos y una curva de fragmentación primaria para los finos. Estas curvas es posible estimarlas mediante modelos numéricos o empíricos. Se decide asignar el  $d_{80}$  de la curva de fragmentación primaria respectiva a cada estado. La utilización de la curva de fragmentación primaria se debe a una mayor facilidad de estimación con respecto a la curva de fragmentación secundaria.

El valor de la abertura de batea ( $D$ ) se asume como la abertura mínima de la misma batea (visera del punto de extracción), ya que se considera como un punto crítico en la formación de arcos de colgaduras al ser la menor dimensión por la que fluye el material. Para obtener el diámetro medio de fragmentos ( $d_m$ ), se genera un corte AA' en el nivel inferior de la batea, donde se encuentra la abertura mínima (punto crítico). Luego, se analizan las celdas presentes en el plano de corte AA', el promedio de los tamaños  $d_i$  de las celdas presentes es el valor de  $d_m$ .

Finalmente se calcula el valor de la razón  $D/d_m$ , donde  $D$  es la abertura mínima en el plano de la visera de la batea y  $d_m$  el tamaño medio de los fragmentos (Figura 42).

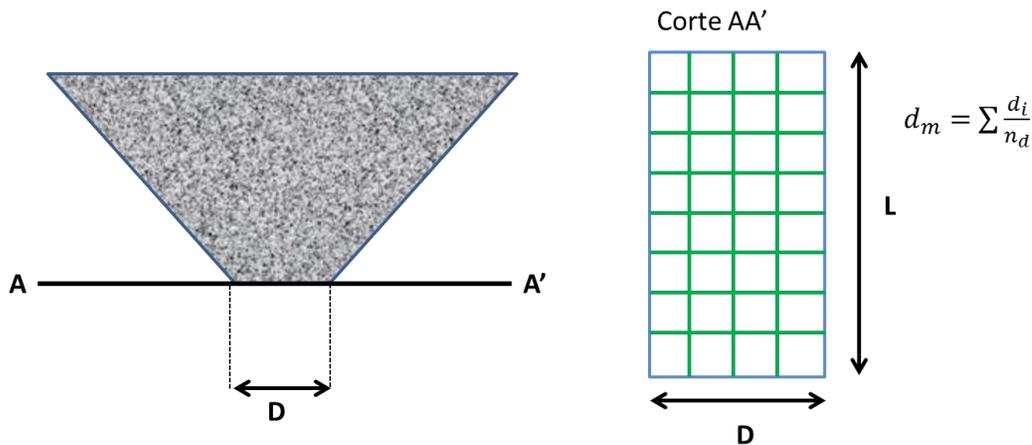


Figura 42: Representación de abertura mínima de batea ( $D$ ) y tamaño medio de las celdas ( $d_m$ ).

### 5.1.2. Sobrecarga de la pila fragmentada

Como se mencionó anteriormente, el esfuerzo vertical aplicado sobre el nivel de producción, producto de la sobrecarga de la pila fragmentada, no va a generar el mismo esfuerzo que la carga litoestática. Para encontrar el valor del esfuerzo generado por la pila, se decide utilizar la ecuación de Janssen (Ecuación 5). Ésta necesita los valores de la altura de la pila fragmentada y el radio hidráulico del footprint activo, para lo que se requiere realizar ciertos supuestos. Para esta propuesta se considera que el cave back conectó con la topografía, por lo tanto la altura de la pila fragmentada ( $z$ ) es la diferencia de altura entre la topografía y el nivel de producción. A medida que la extracción avanza, la topografía disminuye de altura y por consecuencia la altura de la pila también. El área requerida del footprint se puede calcular a través de la producción diaria y la velocidad de extracción y con esto, obtener el valor del radio hidráulico (RH). Finalmente, considerando los supuestos mencionados, se obtiene el valor de la sobrecarga vertical generada por la columna fragmentada ( $\sigma_z$ ).

### 5.2. Elaboración algoritmo predicción de colgaduras

Con  $\sigma_z$  y la razón  $D/d_m$  se obtiene el valor del tonelaje que pasa entre colgaduras ( $H_g$ ). Este valor es el que se utiliza en el algoritmo de colgaduras para decidir si un punto cuelga o no.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de colgaduras.

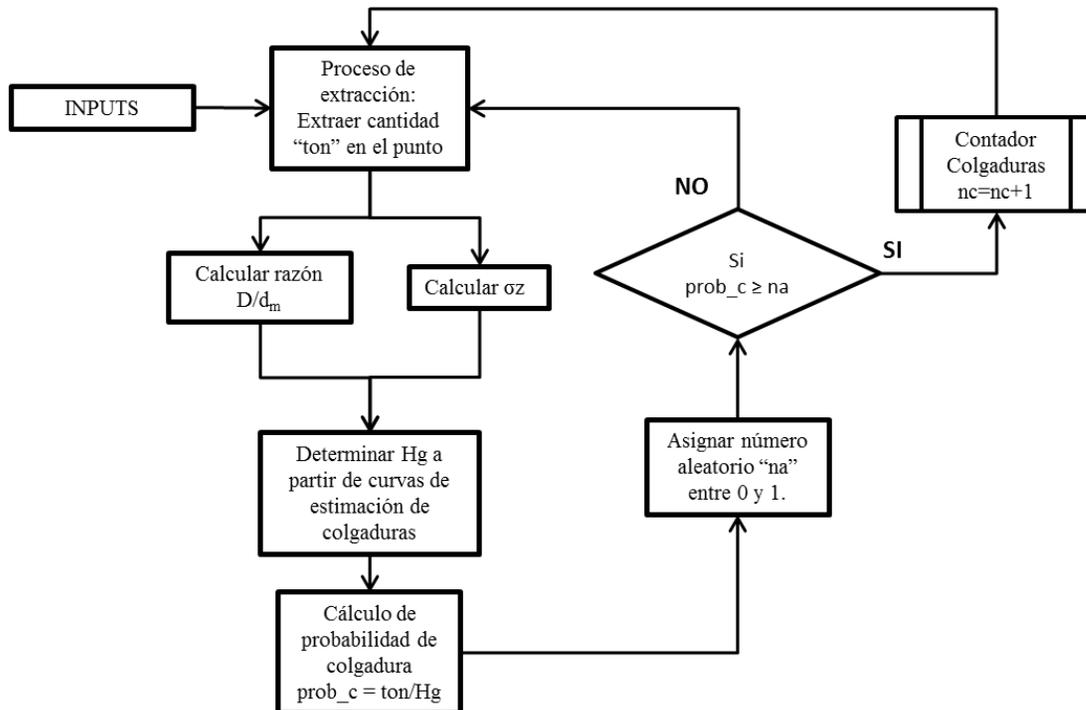


Figura 43: Esquema general del algoritmo de predicción de colgaduras.

Cada vez que se realiza el proceso de extracción se activa el algoritmo de predicción de colgaduras. Primero, se guarda el tonelaje “ton” que se extrajo en el último proceso. Luego, se obtiene  $H_g$  utilizando las curvas de estimación de colgaduras y los valores  $\sigma_z$  y  $D/d_m$ . Posteriormente, se determina un índice de probabilidad de colgaduras ( $prob\_c$ ) cuyo valor es la razón entre el tonelaje “ton” extraído en el último proceso y el valor  $H_g$ . Finalmente se asigna un valor aleatorio ( $na$ ) entre 0 y 1, si “ $na$ ” es menor o igual que el índice de probabilidad “ $prob\_c$ ”, entonces el punto posee colgadura y el contador de estos eventos aumenta en uno.

El código del algoritmo de predicción de colgaduras se encuentra en la sección Anexos A.3 del presente trabajo y está escrito para FlowSim 1.0 (en lenguaje MATLAB).

### 5.3. Caso hipotético

A modo de analizar el comportamiento de la fragmentación en la elección de cuál curva de predicción de frecuencia de colgaduras utilizar en un momento dado de la simulación, se realiza el estudio del siguiente caso hipotético. Se tiene una discretización de bloques de  $2 \times 2 \times 2$  [m<sup>3</sup>], un largo de batea de 10 [m] y un ancho de galería de 4 [m], por lo que el plano de bloques que se genera a la altura de la visera de la batea resulta de una dimensión de  $2 \times 5$  bloques (Figura 44).

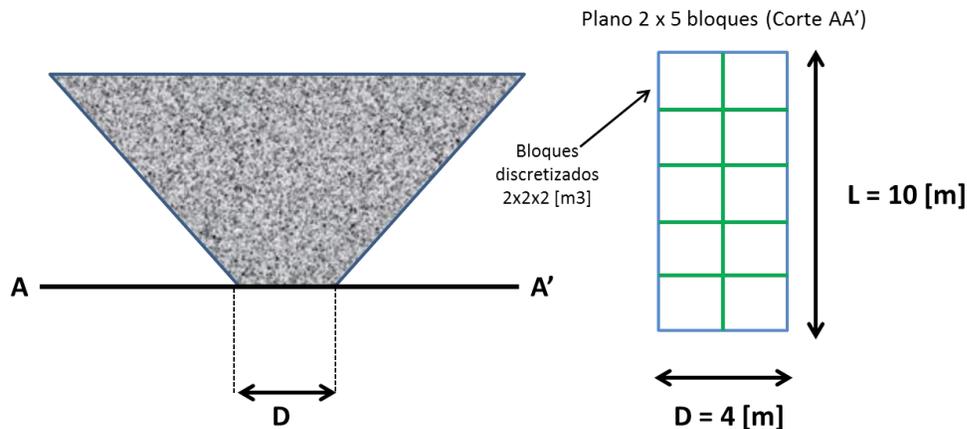


Figura 44: Representación plano a la altura de la visera de la batea en caso hipotético.

Para efectos prácticos, se definen las dos actuales curvas de predicción de frecuencias de colgaduras (elaboradas por Gómez (2014)) y el rango de valores en la razón  $D/d_m$  en el cual actúan (Tabla 14). Además, en la Tabla 15 se indican los datos a utilizar para este análisis.

Tabla 14: Definición de curvas de predicción de frecuencia de colgaduras

Curva	Definición	Límite Inferior (razón $D/d_m$ )	Límite Superior (razón $D/d_m$ )
Curva $D/d_{50}=16$	Curva A	12	$\infty$
Curva $D/d_{50} = 8$	Curva B	0	12

Tabla 15: Datos para caso hipotético de colgaduras

Datos	Valor
Diámetro Fino ( $d_{80}$ )	0,2 [m]
Diámetro Grueso ( $d_{80}$ )	1,2 [m]
Abertura mínima batea (D)	4 [m]

Como se menciona anteriormente, este análisis busca estudiar la elección de la curva de predicción de frecuencia de colgaduras a utilizar en un momento de la simulación dada. Para esto, se varía el número de bloques finos y gruesos presentes en el plano AA' como lo indica la Tabla 16, la que abarca todas las configuraciones posibles. Se observa que a medida que aumenta el número de bloques gruesos en el plano AA', el diámetro medio aumenta, lo que produce una disminución de la razón entre la abertura de mínima de batea (D) y este diámetro medio ( $d_m$ ). La razón  $D/d_m$  determina la elección de la curva a utilizar para el cálculo del tonelaje de material promedio entre colgaduras.

Finalmente, la Tabla 16 también indica que de las 11 configuraciones posibles, sólo dos utilizan la curva A y las otras 9 configuraciones utilizan la curva B. Esto se traduce en que una configuración de bloques gruesos con baja razón  $D/d_m$  (configuración 11) posee la misma estimación de frecuencia de colgaduras, para una misma carga vertical dada, que una configuración de bloques con alta razón  $D/d_m$  (configuración 4). La poca o nula variabilidad de los resultados se debe a que sólo hay dos curvas construidas, por esta razón se determina la necesidad de llevar a cabo experimentos similares a los realizados por Gómez (2014) y elaborar nuevas curvas de predicción de frecuencia de colgaduras en razones de diámetros distintos.

Tabla 16: Fragmentación versus elección de curva de predicción de frecuencia de colgaduras.

Nombre Configuración	Número de bloques en el plano AA' [Finos – Gruesos]	Diámetro medio ( $d_m$ ) [metros]	Razón $D/d_m$	Curva de colgadura a utilizar
1	10 – 0	0,2	20,0	A
2	9 – 1	0,3	13,3	A
3	8 – 2	0,4	10,0	B
4	7 – 3	0,5	8,0	B
5	6 – 4	0,6	6,7	B
5	5 – 5	0,7	5,7	B
7	4 – 6	0,8	5,0	B
8	3 – 7	0,9	4,4	B
9	2 – 8	1,0	4,0	B
10	1 – 9	1,1	3,6	B
11	0 – 10	1,2	3,3	B

## 5.4. Conclusiones del capítulo

Para una posterior implementación del algoritmo de predicción de colgaduras es importante la construcción de nuevas curvas estimativas de colgadura para cada rango de valores de la razón  $D/d_m$ . Por lo anterior, se deben realizar nuevos experimentos en flujo confinado con granulometrías distintas, replicando los ensayos hechos por Gómez (2014). La poca o nula variabilidad de resultados obtenidos en el caso de estudio, reafirman la necesidad anteriormente descrita. La construcción de las curvas y la realización de los experimentos de flujo confinado no son parte del alcance de este trabajo, por lo tanto es una recomendación para la realización de futuras investigaciones.

El algoritmo requiere de nuevos inputs:

- El tamaño  $d_{80}$  para fino y grueso proveniente de curvas de fragmentación.
- Velocidad de extracción y producción diaria.
- Ángulo de fricción.
- Profundidad de la mina (nivel de producción).
- Parámetros de la ecuación de Janssen.
- Curvas propuestas por Gómez (2014).

La propuesta para el algoritmo de predicción de colgaduras posee una sólida base teórica. El algoritmo es creado con la finalidad de conocer el número de eventos de colgadura que se pueden producir en un punto al extraer una cantidad determinada de mineral. Este dato es muy valioso para las faenas mineras ya que tienen la posibilidad de mejorar la planificación minera, conocer el porcentaje de área disponible para la producción, determinar el impacto en el flujo gravitacional debido a la interrupción del tiraje programado, realizar cartas de extracción con menos tiempos muertos y por lo tanto más eficientes, distribuir de mejor forma a las cuadrillas de descuelgue y enviarlas a zonas que presenten mayor cantidad de colgaduras, entre otras cosas. El algoritmo no considera el tiempo en que se mantiene colgado un punto de extracción, sólo se encarga de contar la aparición de estos eventos. Para incorporar el tiempo de descuelgue se recomienda utilizar datos de faena y a partir de un análisis de estos, construir una curva de frecuencia acumulada. Entonces, mediante el método de montecarlo obtener el tiempo total de descuelgue del punto.

El algoritmo de predicción de colgaduras a pesar de estar basado en modelos matemáticos, intenta seguir con la tendencia de las diversas versiones de FlowSim, es decir, otorgar un estado de colgadura en base a un sistema de probabilidades.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones generales

El algoritmo de FlowSim sin considerar flujo preferencial realiza el cálculo de la curva de probabilidad para ascenso de vacíos una sola vez durante la simulación. Sin embargo, el nuevo algoritmo, el cuál considera el mecanismo de flujo preferencial, realiza el cálculo de la curva de probabilidad cada vez que un vacío cumpla la restricción de ascenso. Esto genera un aumento en la cantidad de procesos a llevar a cabo en la simulación y por lo tanto, un posible aumento en los tiempos de simulación. Estos aumentos en tiempos no se pueden medir o determinar debido a que a medida que se implementaba el mecanismo, el algoritmo de FlowSim 3.0 se iba depurando. Además, la futura implementación del algoritmo de predicción de colgaduras también aumenta la cantidad de procesos a realizar. En resumen, cada algoritmo que se integra a FlowSim aumenta la cantidad de procesos, aumentando los tiempos de simulación. A pesar de estos aumentos en la cantidad de procesos y el posible aumento en tiempos de simulación, las simulaciones del sector ICE, utilizando FlowSim 3.0, demostraron tener menores tiempos de proceso en comparación a otros simuladores de flujo gravitacional, alrededor de un 80% menos. De esta forma, se entregan resultados con mayor rapidez y se confirma que una de las ventajas del uso de FlowSim 3.0 como herramienta en la industria minera son sus cortos tiempos de simulación.

El ancho del elipsoide de extracción generado por FlowSim se mide en número de bloques. Por lo tanto, el ancho depende del tamaño de los bloques discretizados que se utiliza. Si el tamaño de los bloques aumenta, el ancho del elipsoide también lo hace y si el tamaño de los bloques disminuye, el ancho disminuye. En resumen, el tamaño de la discretización de los bloques se podría considerar como una posible constante de ajuste.

La heterogeneidad del macizo rocoso de cada una de las faenas dificulta el análisis del comportamiento que tendrán los fragmentos sometidos a flujo gravitacional. Dividir las zonas entre fino y grueso puede ayudar a simplificar el análisis y facilitar la representación del macizo en FlowSim 3.0.

La implementación del flujo preferencial en FlowSim 3.0 permite reproducir de manera consistente las hipótesis realizadas por Laubscher en cuánto a la tendencia de los resultados que produce variar el espaciamiento entre puntos y la heterogeneidad de material de la columna de extracción en la entrada de dilución de los puntos.

Los resultados de las simulaciones realizadas por FlowSim 3.0 para el caso de estudio del sector Inca Central Este, muestran que el simulador podría poseer el potencial de ser utilizado como una herramienta de planificación a largo plazo y a escala de plan de producción de sector debido a que es capaz de representar, con errores de estimación aceptables para proyectos en etapa de prefactibilidad, la ley de cobre mensual, el tonelaje de material extraído, la entrada de dilución a nivel global y la dilución acumulada. Por otro lado, los resultados de punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción, muestran que FlowSim 3.0 no es capaz de representar a nivel cuantitativo el PED obtenido en el caso mina, debido a que los errores asociados (RMSE) son muy elevados. Aunque también, los resultados indican que sí es capaz de representar la cantidad de puntos que se encuentran diluidos y no diluidos (nivel cualitativo) debido al índice de

confiabilidad aceptable que presentan. El alto índice de error se debe a que FlowSim 3.0 no es capaz de reproducir las singularidades del sector ICE, como por ejemplo, el pilar barrera que se forma sobre los puntos inactivos y que impide el paso de material diluyente hacia la zona sur, o como el movimiento lateral de la dilución que produce una entrada temprana de dilución en los puntos de la zona central.

Por otro lado, los resultados de las simulaciones realizadas para el sector ICE permiten determinar que el algoritmo de flujo preferencial, implementado en FlowSim 3.0, funciona de manera correcta con un volumen de datos a nivel industrial. Lo anterior es debido a que al aumentar el valor de M se observa una mayor capacidad de movimiento de bloques que poseen menor RMR (dilución) por sobre los bloques con alto RMR (mineral). En otras palabras, se obtiene un mayor ingreso de dilución en los puntos y de manera más temprana, lo cual es la lógica de este mecanismo. La misma situación ocurre con las otras simulaciones realizadas en FlowSim 1.0 y 3.0. Además, a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas a nivel industrial, se concluye que el flujo preferencial es un mecanismo que tiene el potencial de representar de mejor forma el comportamiento del flujo gravitacional, ya que ayudaría a mejorar la capacidad de predicción del ingreso de dilución, el cual es uno de los principales objetivos del presente trabajo. Para lo anterior, es necesario confirmar con un proceso de calibración y validación del simulador.

La propuesta para el algoritmo de predicción de colgaduras posee una sólida base teórica. El algoritmo es creado con la finalidad de conocer el número de eventos de colgadura que se pueden producir en un punto, al extraer una cantidad determinada de mineral. Este dato es muy valioso para las faenas mineras ya que tienen la posibilidad de mejorar la planificación minera, conocer el porcentaje de área disponible para la producción, determinar el impacto en el flujo gravitacional debido a la interrupción del tiraje programado, realizar cartas de extracción con menos tiempos muertos y por lo tanto más eficientes, distribuir de mejor forma a las cuadrillas de descuelgue y enviarlas a zonas que presenten mayor cantidad de colgaduras, entre otras cosas. La propuesta para el algoritmo de predicción de colgaduras no considera el tiempo en que permanece colgado un punto de extracción, lo que puede provocar un error en la representación del flujo gravitacional al poder extraer en el punto en tiempos o período en que no debería.

A pesar de estar basado en modelos matemáticos, el algoritmo de predicción de colgaduras intenta seguir con la tendencia de las diversas versiones de FlowSim, es decir, otorgar un estado de colgadura en base a un sistema de probabilidades.

## **6.2. Recomendaciones**

Dadas las conclusiones del presente trabajo y con la intención de apoyar el desarrollo y la evolución de FlowSim 3.0 en futuros trabajos, se enumeran las siguientes recomendaciones.

1. Analizar el aumento en los tiempos de simulación cada vez que se integra un nuevo algoritmo en FlowSim. Además, estudiar si los beneficios de la integración de este algoritmo superan los costos que conlleva el aumento en los tiempos de simulación.

2. Estudiar el real efecto que produce el tamaño de la discretización de los bloques en la simulación. Se recomienda realizar varias simulaciones del mismo tipo, variando el tamaño de los bloques discretizados para posteriormente analizar los resultados obtenidos y su posible consideración como constante de ajuste.
3. Realizar la calibración y posterior validación de FlowSim 3.0. El proceso de calibración consiste en elegir una base de datos que contenga registro de la extracción histórica de alguna mina que presente diferentes calidades de macizo rocoso o evidencia de migración de finos. El objetivo es llevar a cabo diferentes simulaciones, variando el valor de cada una de las constantes de ajuste, para luego, comparar los resultados obtenidos de cada simulación con el registro histórico de la mina. Los registros históricos a comparar pueden ser ley de cobre por período, dilución por período o acumulada, punto de entrada de dilución, entre otros. La comparación de resultados se puede realizar mediante herramientas estadísticas o índices de comparación como el RMSE, el error relativo medio, la confiabilidad, etc. La simulación que posea resultados con los más altos índices de comparación es la que representa de mejor forma los registros históricos de la mina. Los valores de las constantes de ajustes de esta simulación son utilizados en el posterior proceso de validación. El objetivo es predecir, con FlowSim 3.0 y con los valores de las constantes de ajustes obtenidos en el proceso de calibración, el registro histórico de otra base de datos.
4. Para mejorar la capacidad de predicción de la entrada de dilución en los puntos de extracción en FlowSim 3.0, se pueden implementar, al igual que el flujo preferencial, otros mecanismos que ayuden a representar de mejor forma el comportamiento del flujo gravitacional. Valencia (2014), quien planteó el flujo preferencial, genera una propuesta para incluir otros dos mecanismos: el cave back y el rilling interno. Actualmente, FlowSim considera que el material que está sobre los puntos de extracción está siempre dispuesto a fluir, lo que en la realidad no es así. La columna de material in-situ va fragmentándose a medida que ocurre la extracción (cave back). El rilling interno corresponde a un reordenamiento de la pila de material fragmentada que queda mientras la columna in-situ no ha fragmentado completamente. La combinación de estos dos mecanismos permite modelar el desplazamiento horizontal o lateral del material dentro de la pila fragmentada (dilución lateral). Este desplazamiento o mecanismo es descrito por Paredes (2012) y produce entrada temprana de dilución en los puntos que no es modelada por FlowSim 3.0.
5. Para una posterior implementación de la propuesta de algoritmo de predicción de colgaduras y poseer una mayor variabilidad, o mejor dicho, representatividad en las estimaciones, es importante la construcción de nuevas curvas estimativas de frecuencia de colgadura para cada rango de valores de la razón  $D/d_m$ . Por lo anterior se deben realizar

nuevos experimentos en flujo confinado con granulometrías distintas, replicando el trabajo hecho por Gómez (2014).

6. Para mejorar el algoritmo de predicción de colgaduras se puede considerar incorporar el tiempo en que se mantiene colgado el punto, de manera que mientras permanece colgado, no se pueda extraer material del punto. Para incorporar el tiempo de descuelgue, recomienda utilizar datos de faena y a partir de un análisis de estos, construir una curva de frecuencia acumulada. Entonces, mediante el método de montecarlo obtener el tiempo total de descuelgue del punto.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Armijo, F., Castro, R. y Irribarra, S. (2014). Experimental study of fines migration for caving mines. Caving 2014.

Baxter, G. y Behringer, R. (1991). Cellular automata models of granular flow. *Physica Review A*, pp. 1017-1020.

Castro, R. (2006). Study of the mechanism of gravity flow for block caving. Tesis doctoral, University of Queensland, Australia.

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

Castro, R., Gonzalez, F. y Arancibia, E. (2009). Development of a gravity flow numerical model for evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*.

Castro, R. y Rubio, E. (2009). Efectos de los mecanismos de dilución en la estimación de reservas de la mina Chuquicamata subterránea. Estudio complementario, Universidad de Chile.

Cornejo, M. (2008). Impacto en la productividad del nivel de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción. Memoria de Título, Universidad de Chile.

Craig R F. (2004). Basic characteristics of soils. En: *Craig's Soil Mechanics*. 7° edición. pp 1-29.

Fernandez, F. (2009). Modelación numérica de flujo gravitacional. Memoria de Título, Universidad de Chile.

Fuenzalida, M. (2012). Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería del caving. Tesis de Magister, Universidad de Chile.

Gómez, R. (2014). Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. Memoria de Título, Universidad de Chile.

González, F. (2008). Metodología para diseño de mallas de extracción incorporando autómatas celulares. Memoria de Título, Universidad de Chile.

Hustrulid, W. y Sun, C. (2004). Some remarks on ore pass design guidelines. *Massmin 2004*.

Irribarra, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de caving. Memoria de Título, Universidad de Chile.

Jolley, D. (1968). Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mining pillar. *The Canadian Mining and Metallurgical*, pp. 854-859.

- Kvapil, R. (1965). Gravity flow of granular materials in hoppers and bins in mines-II. Coarse material. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 2, pp. 277-292. Pergamon.
- Kvapil, R. (1992). Sublevel caving. *SME mining engineering handbook*, 2° edición.
- Kvapil, R. (2008). Gravity flow in sublevel and panel caving – A common sense approach
- Laubscher, D. (1994). Cave Mining – the state of the art. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Laubscher, D. (2000). Block caving manual. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- Maass, S. (2013). Alternativas Tecnológicas para el descuelgue de zanjas. Tesis de Magister, Universidad de Chile.
- Miranda, O. (2012). FlowSim: Simulador de flujo granular. Informe Técnico. Alges, Universidad de Chile.
- Nedderman, R. M. (1992). Statics and kinematics of granular materials. Cambridge University Press: Cambridge.
- Paredes, P. (2012). Mecanismos de entrada de dilución en minas de block/panel caving. Tesis de Magíster, Universidad de Chile.
- Power, G. (2004). Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modeling and full scale experiments. Tesis doctoral, The University of Queensland, Australia.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (part 1). *Proceedings of MassMin 2004*, Santiago, Chile.
- Troncoso, S. (2006). Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción. Memoria de Título, Universidad de Chile.
- Valencia, M. (2014). Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving. Memoria de Título, Universidad de Chile.
- Walker, D. M. (1966). An approximate theory for pressure and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science*.

## ANEXO A: ALGORITMOS DE FLOWSIM

### A.1. Antiguo código de cálculo de curva de probabilidad

```
1 %código antiguo (sin flujo preferencial)
2 %curva de distribución es calculada sólo una vez en la simulación (al inicio)
3
4 %inicializar variables
5 rmr_grueso=70;
6 rmr_fino=10;
7 b_dim_z=10;
8 b_dim_x=10;
9 b_dim_y=10;
10 n=3.4;
11 m=1.5;
12
13 % inicializa curvas de probabilidad
14 calc_prob=[0 0 0];
15 prob2=zeros(1,9);
16
17 %calculo de las distancia central, lateral y esquina
18 dist1=b_dim_x;
19 dist2=(dist1^2+dist1^2)^(1/2);
20 dist3=(dist1^2+dist2^2)^(1/2);
21
22 %calculo del denominador comun (suma de todo)
23 den=dist1^(-n)+4*dist2^(-n)+4*dist3^(-n);
24
25 %calculo de las probabilidades
26 calc_prob(1,1)=dist1^(-n)/den;
27 calc_prob(1,2)=dist2^(-n)/den;
28 calc_prob(1,3)=dist3^(-n)/den;
29
30 %calculo de curva de probabilidad acumulada
31 %cada posicion del vector indica uno de los nueve bloques a escoger
32 prob2(1,2)=prob2(1,1)+calc_prob(1,1);
33 prob2(1,3)=prob2(1,2)+calc_prob(1,2);
34 prob2(1,4)=prob2(1,3)+calc_prob(1,2);
35 prob2(1,5)=prob2(1,4)+calc_prob(1,2);
36 prob2(1,6)=prob2(1,5)+calc_prob(1,2);
37 prob2(1,7)=prob2(1,6)+calc_prob(1,3);
38 prob2(1,8)=prob2(1,7)+calc_prob(1,3);
39 prob2(1,9)=prob2(1,8)+calc_prob(1,3);
```

## A.2. Código Flujo Preferencial (Nuevo cálculo de curva de probabilidad)

```
1 %algoritmo flujo preferencial
2 %curva de distribucion es calculada cada vez que se estudia un vacio
3
4 %inicializar variables
5 rmr_grueso=70;
6 rmr_fino=10;
7 b_dim_z=10;
8 b_dim_x=10;
9 b_dim_y=10;
10 n=3.4;
11 m=1.5;
12
13 %reiniciar curva de probabilidad
14 calc_prob=[0 0 0 0 0 0 0 0 0];
15 prob2=zeros(1,9);
16
17 %calculo de las distancias central, lateral y esquina
18 dist_c=b_dim_x;
19 dist_l=(dist_c^2+dist_c^2)^(1/2);
20 dist_e=(dist_c^2+dist_l^2)^(1/2);
21
22 %reiniciar denominador
23 den=0;
24
25 % analisis de la vecindad del vacio y se asigna RMR^m respectivo para cada bloque
26 for mf1=1:9
27     if a(jstp2(mf1)+j,kstp2(mf1)+k,i1)>0 %si es grueso asigna rmr_grueso
28         RMR_vector(mf1)=rmr_grueso^(-m);
29     elseif a(jstp2(mf1)+j,kstp2(mf1)+k,i1)==-10^6 %si es fino asigna rmr_fino
30         RMR_vector(mf1)=rmr_fino^(-m);
31     elseif a(jstp2(mf1)+j,kstp2(mf1)+k,i1)==-2*10^6 %si es vacio asigna 0
32         RMR_vector(mf1)=0;
33     elseif a(jstp2(mf1)+j,kstp2(mf1)+k,i1)==0 %si es solido asigna 0
34         RMR_vector(mf1)=0;
35     end
36 end
37
38 %calculo del denominador comun (suma de todo)
39 den=dist_c^(-n)*RMR_vector(1)+dist_l^(-n)*(RMR_vector(2)+RMR_vector(3)+RMR_vector(4)+RMR_vector(5));
40 den=den+dist_e^(-n)*(RMR_vector(6)+RMR_vector(7)+RMR_vector(8)+RMR_vector(9));
41
42 %calculo de las probabilidades
43 calc_prob(1,1)=dist_c^(-n)*RMR_vector(1)/den;
44 calc_prob(1,2)=dist_l^(-n)*RMR_vector(2)/den;
45 calc_prob(1,3)=dist_l^(-n)*RMR_vector(3)/den;
46 calc_prob(1,4)=dist_l^(-n)*RMR_vector(4)/den;
47 calc_prob(1,5)=dist_l^(-n)*RMR_vector(5)/den;
48 calc_prob(1,6)=dist_e^(-n)*RMR_vector(6)/den;
49 calc_prob(1,7)=dist_e^(-n)*RMR_vector(7)/den;
50 calc_prob(1,8)=dist_e^(-n)*RMR_vector(8)/den;
51 calc_prob(1,9)=dist_e^(-n)*RMR_vector(9)/den;
52
53 %calculo de curva de probabilidad acumulada
54 %cada posicion del vector indica uno de los nueve bloques a escoger
55 prob2(1,2)=prob2(1,1)+calc_prob(1,1);
56 prob2(1,3)=prob2(1,2)+calc_prob(1,2);
57 prob2(1,4)=prob2(1,3)+calc_prob(1,3);
58 prob2(1,5)=prob2(1,4)+calc_prob(1,4);
59 prob2(1,6)=prob2(1,5)+calc_prob(1,5);
60 prob2(1,7)=prob2(1,6)+calc_prob(1,6);
61 prob2(1,8)=prob2(1,7)+calc_prob(1,7);
62 prob2(1,9)=prob2(1,8)+calc_prob(1,8);
```

### A.3. Código Predicción de Colgaduras

```
1  %Código Predicción de Colgaduras
2
3  %Defino INPUTS
4  dens=1600 %kg/m3
5  g=9.8 %m/s2
6  D_abertura=4; %m
7  d80_grueso=1.2; %m
8  d80_fino=0.2; %m
9  corte_aa=H_dp+1; %altura minima batea
10 Vext=0.5; %t/m2-dia
11 produccion=25000; %t/dia
12 profundidad=200; %m
13 qo=0;
14
15 %Constantes de curvas hipotéticas escaladas a nivel mina
16 %Hg=Hgo*exp(-erre*sigmav)
17 Hgo1=10000;
18 Hgo2=10000;
19 Hgo3=10000;
20 erre1=0.27;
21 erre2=0.2;
22 erre3=0.1;
23
24 %Intervalos D/dm para curvas hipotéticas
25 lim_inf=2.5;
26 lim_med=3.5;
27 lim_sup=5;
28
29 %Constantes ecuación Jansen & Walker propuesto por (Fuenzalida,2012)
30 peso_esp=g*dens; %t/(m2*s2)
31 phi=38; %ang friccion en grados
32 mu=tan(phi*pi()/180); %coef friccion
33 area=produccion/Vext; %m2
34 perimetro=4*area^0.5; %m
35 RH=area/perimetro; %m
36
37 %Correccion para coef entre esfuerzo vertical y horizontal
38 coef_k=(1-(sin(phi*pi()/180))^2)/(1+(sin(phi*pi()/180))^2);
39
40 %Obtener los bloques que pertenecen al plano de corte_aa en la batea nb
41 plano_aa(:, :)=a(coord_x(nb,1):coord_x(nb,2),coord_y(nb,1):coord_y(nb,2),corte_aa);
42 denom=sum(sum(plano_aa(:, :)>=-10^6))-sum(sum(plano_aa(:, :)==0));
43
44 %reinicio de suma de tamaño
45 suma_d=0;
46
```

```

47 %Suma los tamaños de los bloques que pertenecen al plano aa
48 for j=1:size(plano_aa,2)
49     for i=1:size(plano_aa,1)
50         if plano_aa(i,j)>=-10^6 %si es grueso suma d80_grueso
51             if plano_aa(i,j)>0
52                 suma_d=suma_d+d80_grueso;
53             elseif plano_aa(i,j)==-10^6 %si es fino suma d80_fino
54                 suma_d=suma_d+d80_fino;
55             elseif plano_aa(i,j)=0 %si es bloque vacio no suma
56                 suma_d=suma_d;
57             end
58         end
59     end
60 end
61
62 %se obtiene el diametro medio
63 d_medio=suma_d/denom;
64
65 %razón D/dm
66 ratio_d=D_abertura/d_medio;
67
68 %altura pila es equivalente a la altura maxima de la topo
69 %la topo desciende a medida que la extracción avanza
70 Hp=topomax;
71
72 %Ecuacion Jansen & Walker para obtener la carga vertical de la pila
73 sigma_z=gamma*RH/(mu*coef_k)*(1-exp(-Hp*coef_k*mu/RH))+qo*exp(-Hp*coef_k*mu/RH);
74
75 %Obtengo tonelaje entre colgaduras Hg del punto en estudio
76 if lim_inf<ratio_d<=lim_med
77     Hg(drawpoint)=Hgo1*exp(-erre1*sigma_z);
78 elseif lim_medio<ratio_d<=lim_sup
79     Hg(drawpoint)=Hgo2*exp(-erre2*sigma_z);
80 elseif lim_sup<ratio_d
81     Hg(drawpoint)=Hgo3*exp(-erre3*sigma_z);
82 end
83
84 %Calculo de probabilidad de colgadura
85 %ton es el tonelaje que se extrajo en el ultimo proceso de extracción
86 prob_c=ton/Hg(drawpoint);
87
88 %Asigna número aleatorio con distribución uniforme
89 na=rand;
90
91 %Condicion de colgadura
92 if prob_c>=na
93     %Contador de colgaduras aumenta en 1 en el punto
94     nc(drawpoint)=nc(drawpoint)+1;
95 end

```

## ANEXO B: RESULTADOS COMPARACIÓN FLOWSIM 3.0 CON ICE

En esta sección se muestran en detalles los resultados de la comparación entre las simulaciones realizadas por FlowSim 3.0 y los datos mina para el sector Inca Central Este.

La Figura 45 muestra los tonelajes de material extraídos y simulados por FlowSim 3.0 para el sector Inca Central Este.

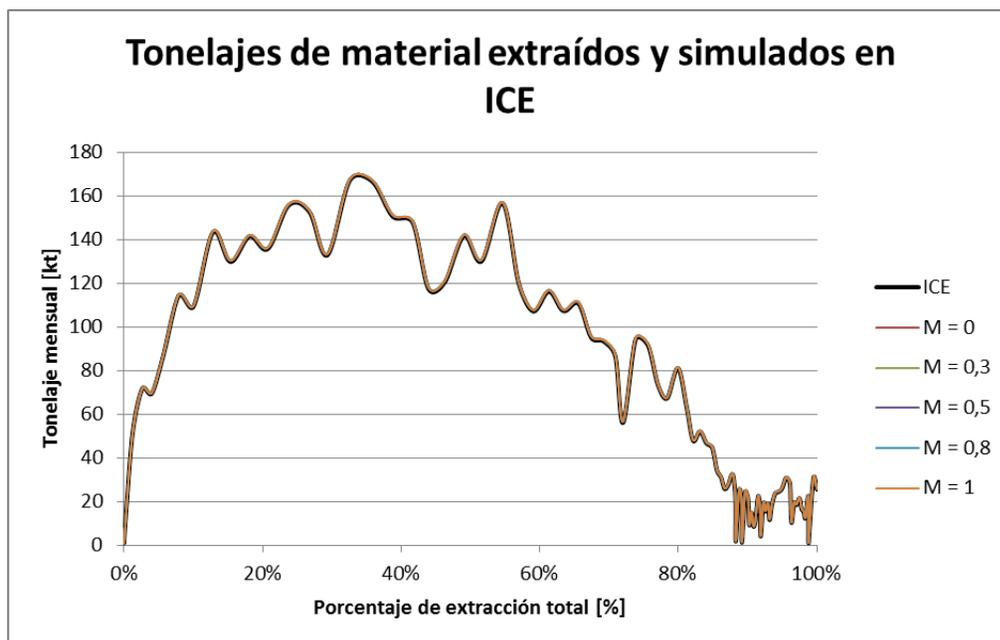


Figura 45: Tonelajes extraídos y simulados en sector ICE.

La Figura 46 muestra las leyes de cobre extraídas y simuladas por FlowSim 3.0 para el sector Inca Central Este.

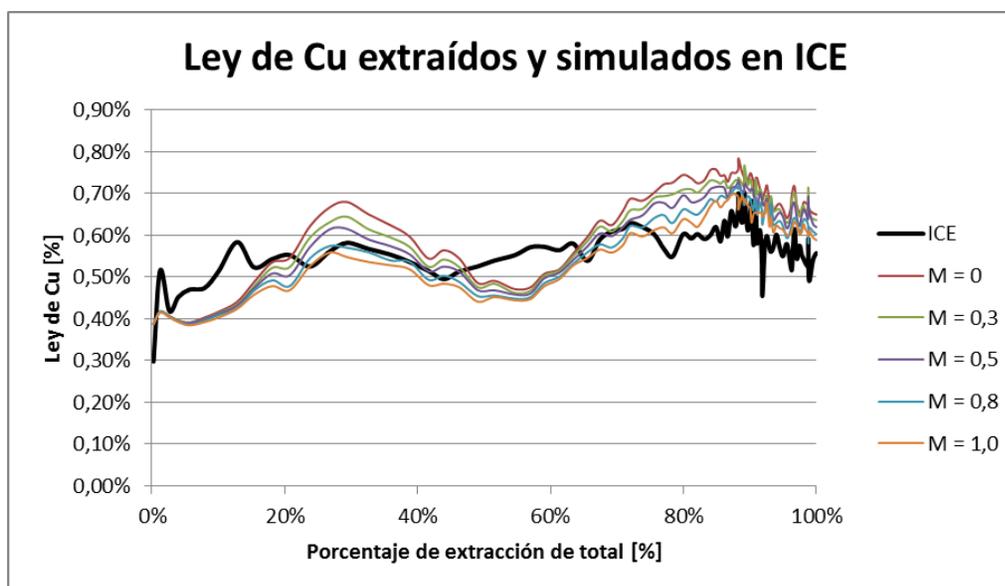


Figura 46: Leyes de Cu extraídos y simulados en ICE.

La Figura 47 muestra la dilución acumulada extraída y simulada por FlowSim 3.0 para el sector Inca Central Este.

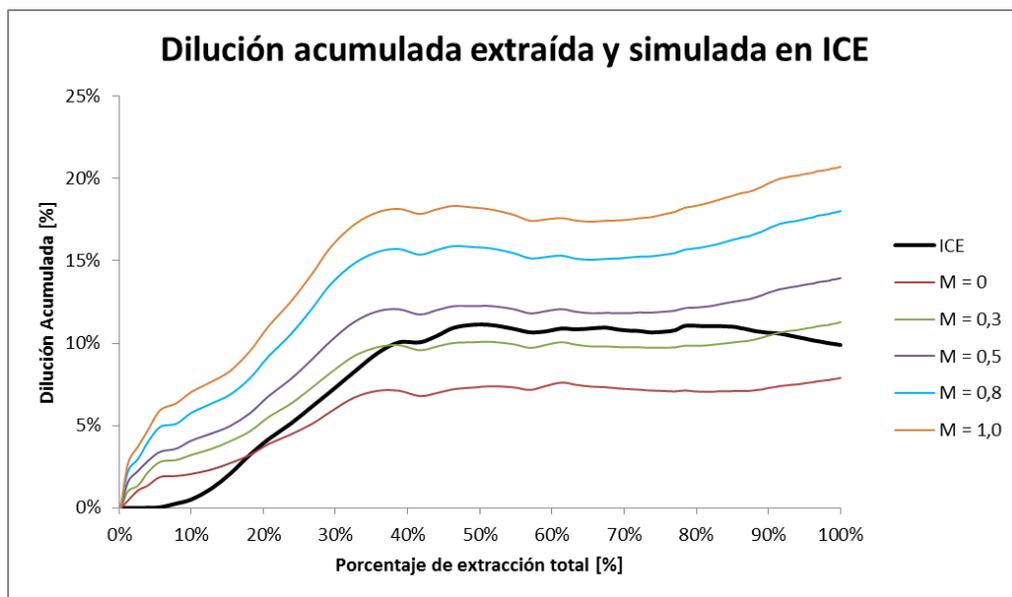


Figura 47: Dilución acumulada extraídos y simulados en ICE.

La Figura 48 muestra el contenido de dilución extraída y simulada por FlowSim 3.0 para el Sector Inca Central Este.

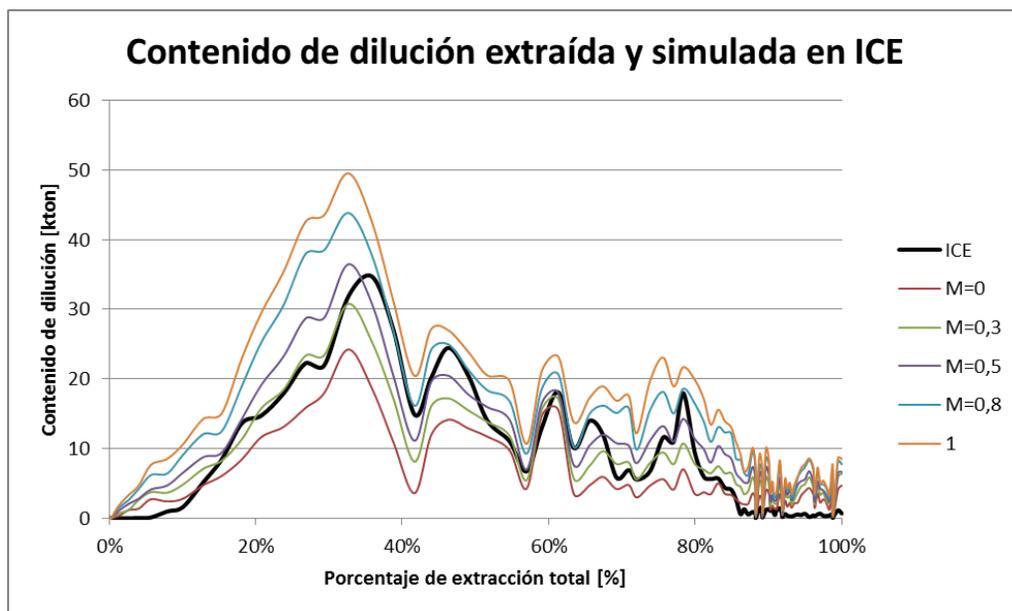


Figura 48: Contenido de dilución extraída y simulada en ICE.

La Figura 49 muestra el punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción (PED(3%)) de los datos mina junto con el PED(3%) simulado por FlowSim 3.0 para el sector ICE.

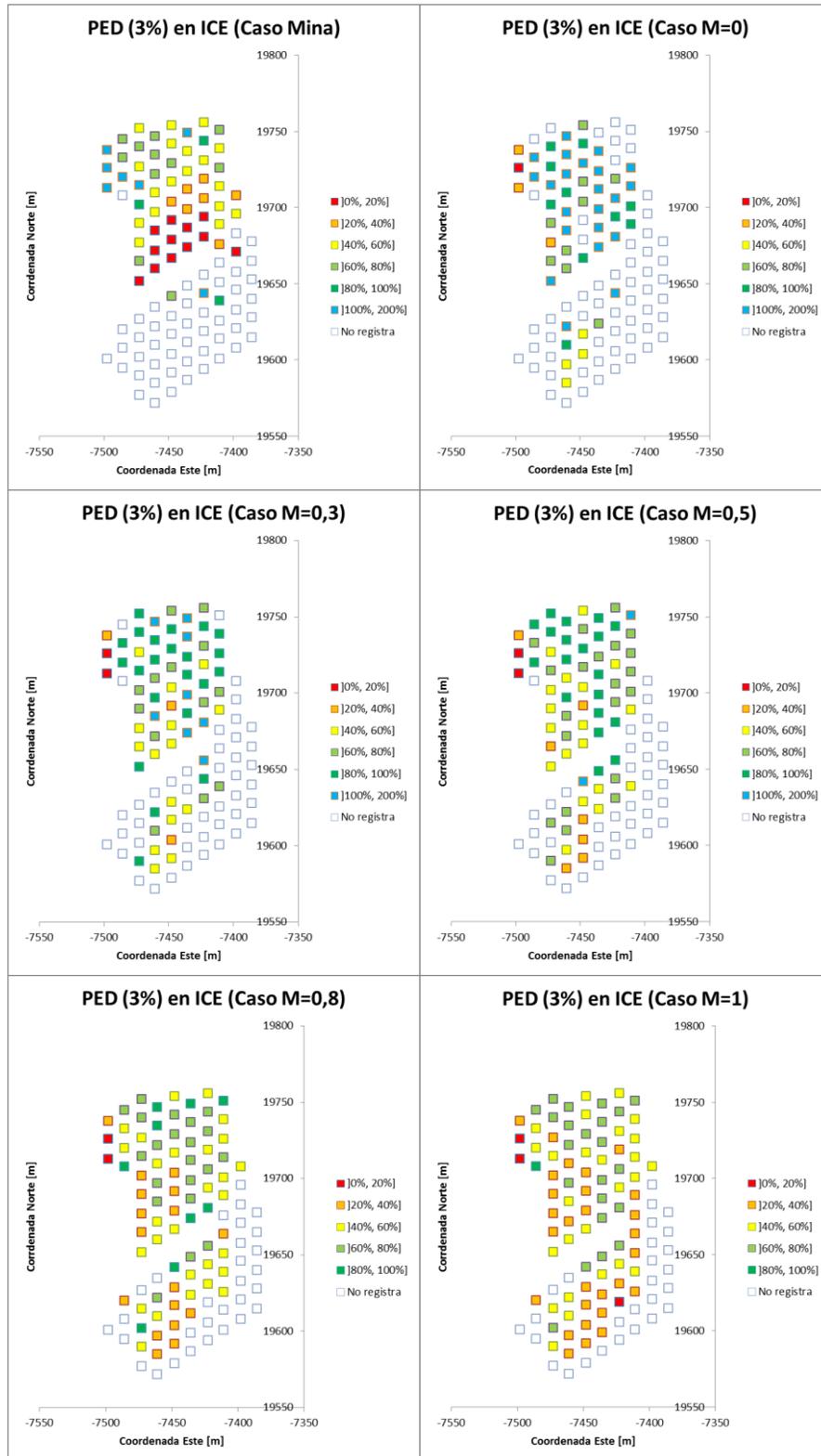


Figura 49: Vista en planta PED (3%) datos mina y PED (3%) simulado por FlowSim 3.0.