



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

**ESTUDIO DE FLOWSIM COMO UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE FLUJO  
GRAVITACIONAL**

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

**JAIME ARTURO ROJAS ATAO**

**PROFESOR GUÍA:**

**RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**MARIA ELENA VALENCIA VERA**

**ALVARO ALTAMIRANO CONDOR**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2017**

## RESUMEN

El Block Caving es un tipo de extracción minera vigente como método para viabilizar la recuperación de cuerpos minerales ubicados a gran profundidad (Chuquicamata subterránea, Grasberg Block Cave, DMLZ). Aunque se han hecho esfuerzos para el entendimiento del fenómeno de extracción que ocurre en el Block Caving, flujo gravitacional, existen todavía interrogantes sobre cuáles son los parámetros que más inciden en su desarrollo. FlowSim es un simulador que modela el comportamiento del flujo gravitacional a través del concepto de autómatas celulares. FlowSim cuenta con la implementación de algunos mecanismos de flujo gravitacional, carta de extracción, rilling y flujo preferencial. Estos parámetros le han concedido al programa buena precisión en la predicción de leyes y dilución, para un alcance temporal de largo y mediano plazo, sin embargo, queda pendiente la precisión para el corto plazo.

El trabajo de investigación tiene como objetivo la evaluación y mejora del software FlowSim como herramienta de modelamiento de flujo gravitacional. Se realiza en primera instancia el estudio de las zonas de extracción determinadas por los trazadores ubicados en terreno. Se observa sus principales características y luego se calibra el simulador en base al tonelaje de salida de los trazadores. La evaluación se efectúa contrastando las características que el simulador no toma en cuenta y se plantean metodologías de implementación con el propósito mejorar el simulador.

El análisis de las zonas de extracción da como resultado que la uniformidad (Susaeta 2004) y la granulometría tienen un rol importante como parámetros del flujo, sin embargo, la uniformidad tiene mayor preponderancia en el flujo. Mientras el índice de uniformidad de los puntos que componen una batea sean del mismo tipo (uniforme, semiuniforme y aislado) y tengan valores parecidos de tonelaje extraídos de ese tipo ( $< 5\%$ ), el flujo tiende a desarrollarse de forma regular. Por otro lado, si los puntos analizados presentan más del 60% del tonelaje de extracción aislada siempre ocurrirá flujo irregular. Finalmente, solo cuando el índice de uniformidad sea distinto para los puntos de extracción en análisis la granulometría incidirá significativamente.

El análisis de altura de extracción y altura de posicionamiento de los trazadores da como resultado la contracción del diámetro de las zonas de extracción, para los trazadores ubicados por sobre los 50 m del nivel de hundimiento. El diámetro de la zona de extracción pasa de 36m a 22 m desde los 50 m. Esta característica observada difiere de lo reproducido en la simulación de FlowSim. La calibración muestra un error de predicción del tonelaje de extracción de los trazadores de 16 kton, no obstante, las replicas muestran formas similares de las zonas de extracción reales y emuladas.

En base al hallazgo de contracción del diámetro de la zona de extracción obtenida, se plantea la implementación del cave back y el efecto de porosidad variable en altura. Mientras que la implementación del cave back se basa en observación de terreno; la porosidad variable en altura tiene su justificación debido al fenómeno de fragmentación secundaria, fenómeno que disminuye la granulometría durante el proceso de extracción. Ya que se observa del análisis de las zonas de extracción generada por los trazadores que, la granulometría pasa a ser la variable principal del flujo cuando la uniformidad de los puntos de una batea difieren ( $>5\%$ ), la implementación de la porosidad en altura tiene plena justificación.

La implementación de estos mecanismos complementará los buenos resultados del simulador y de esta forma ayudará al aporte de FlowSim sobre el modelamiento del flujo gravitacional.

## ABSTRACT

Block Caving is a type of mining in force as a method to enable the recovery of mineral bodies located at great depth (Chuquicamata subterránea, Grasberg Block Cave, DMLZ). Although efforts have been made to understand the phenomenon of extraction that occurs in Block Caving, gravitational flow, there are still questions about which are the most important parameters in its development. FlowSim is a simulator that models the behavior of the gravitational flow through the concept of cellular automata. FlowSim has the implementation of some mechanisms of gravitational flow, extraction chart, rilling and preferential flow. These parameters have given the program good precision in the prediction of ore grades and dilution, for a long and medium term temporal scope, however, the precision for the short term remains.

The research work is aimed at evaluating and improving FlowSim software as a gravitational flow modeling tool. It is carried out in the first instance the study of the extraction zones determined by the tracers located in the ground. Its main features are observed and then the simulator is calibrated based on the tonnage of the tracer output. The evaluation is carried out by contrasting the characteristics that the simulator does not take into account and then implementation methodologies with the purpose to improve the simulator are made.

The analysis of the extraction zones results in uniformity index (Susaeta 2004) and granulometry have an important role as flow parameters, however, uniformity index has a greater preponderance in flow. As long as the uniformity index of the points that compound a drawbell are of the same type (uniform, semi-uniform and isolated) and have similar values of tonnage extracted of that type (<5%), the flow tends to develop on a regular basis. On the other hand, if the analyzed points present more than 60% of the isolated extraction tonnage, irregular flow will always occur. Finally, only when the uniformity index is different for the extraction points under analysis, the granulometry will be significantly affected.

The analysis of extraction height and positioning height of the tracers results in the contraction of the diameter of the extraction zones, for tracers located over 50 m from the undercut level. The diameter of the extraction zone passes from 36m to 22m from the 50m. This observed characteristic differs from that reproduced in FlowSim simulation. The calibration shows a prediction error of the tracers extraction tonnage of 16 kton, however the replicates show similar forms of the real and emulated extraction zones.

Based on the finding of contraction of the extraction zone diameter, it is propose the implementation of the cave back and the effect of porosity variable in height. While the implementation of cave back is based on in situ mine observation, porosity variable in height has its justification due to the phenomenon of secondary fragmentation, a phenomenon that decreases granulometry during the extraction process. Since it is observed from the analysis of the extraction zones generated by the tracers that, granulometry becomes the main variable of the flow when the uniformity of the points of a drawbell differ (> 5%), the implementation of the porosity in height has full justification.

The implementation of these mechanisms will complement the good results of the simulator and in this way will help FlowSim's contribution to the gravitational flow modeling.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivación .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>1.3 Alcances.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Metodología .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Contenido por capítulo .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>Antecedentes teóricos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Flujo gravitacional .....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Modelamiento experimental arena .....	5
2.1.2 Modelamiento experimental grava .....	6
2.1.3 Modelos empíricos.....	7
2.1.4 Simuladores de flujo gravitacional .....	10
<b>2.2 FlowSim simulador cinemático de flujo gravitacional.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Breve cronología.....	13
2.2.2 Caracterización de FlowSim.....	14
2.2.3 Principales inputs de FlowSim .....	16
2.2.4 Mecanismos implementados en FlowSim .....	17
<b>2.3 Estudios a escala mina con trazadores .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Ridgeway deeps investigación de trazadores .....	18
<b>2.4 Conclusiones .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>24</b>
<b>Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1Esmeralda .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Esmeralda Bloque 2 .....	24
<b>3.2 Trazadores .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Descripción de la tecnología de marcadores inteligentes.....	26
<b>3.3. Prueba de flujo gravitacional mediante trazadores inteligentes.....</b>	<b>28</b>

3.3.1. Campo cercano .....	28
3.3.2. Campo lejano .....	28
3.3.3. Instalación operacional de trazadores .....	29
3.3.4 Instalación de lectores .....	30
3.4 Análisis de sensibilidad FlowSim .....	31
3.4.1. Análisis de los parámetros de entrada de FlowSim.....	31
3.5 Índice de uniformidad vectorizado (VUI).....	33
4.2.2 Análisis granulométrico .....	34
3.5 Conclusiones .....	34
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>36</b>
<b>Generación y análisis de resultados.....</b>	<b>36</b>
4.1 Análisis zonas de extracción trazadores de campo cercano .....	36
4.1.1 Política de extracción .....	36
4.2 Análisis zanja a zanja.....	37
4.2.1 Análisis zanja 30 .....	37
4.2.2 ZANJA 31.....	42
4.2.3 Zanja 32.....	47
4.2.4 Zanja 33.....	52
4.2.5 Zanja 34.....	57
4.2.6 Principales conclusiones del análisis de las zonas de extracción .....	62
4.3 Análisis de trazadores de campo cercano remanentes.....	62
4.4 Trazadores de largo alcance.....	64
4.4.1 Índice de uniformidad.....	65
4.4.2 Carta de extracción detalle.....	65
4.4.3 Granulometría .....	67
4.4.4 Comparativa altura real y de extracción de trazadores de campo lejano.....	68
4.4.5 Movimiento de trazadores .....	69
4.6 Análisis conjuntos trazadores de campo cercano y lejano.....	70
4.7 Estudio conciliación de datos con simulaciones FlowSim.....	72
4.7.1 Calibración de FlowSim.....	72
4.7.2 Análisis de calibración campo cercano.....	76
4.7.3 Campo lejano.....	77
4.8 Conclusiones del capítulo.....	79

4.8.1 Datos mina trazadores .....	79
4.8.2 Simulaciones .....	80
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>81</b>
<b>Recomendación de mejoras para el software FlowSim y análisis conceptual .....</b>	<b>81</b>
5.1 Análisis de mecanismos.....	81
5.1.1 Cave back .....	82
5.1.2 Fragmentación secundaria .....	82
5.1.3 Interlocking.....	82
5.1.4 Análisis conjunto de los mecanismos .....	83
5.2 Implementación de mejoras. ....	84
5.2.1 Implementación de porosidad en altura.....	84
5.2.2 Implementación cave back .....	84
5.3 Conclusiones .....	86
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>87</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
<b>Enfoque a futuro .....</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>92</b>
<b>Anexo B .....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo C .....</b>	<b>98</b>

# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

El actual escenario de la minería mundial presenta grandes desafíos; el bajo precio del cobre, la disminución de las leyes y mayores costos de operación e inversión; por nombrar a los más importantes. El método de explotación Block Caving, permite viabilizar proyectos masivos profundos que exhiben leyes bajas, esto debido a sus características de gran productividad y bajo costo operacional.

Aunque se han hecho esfuerzos por entender los fenómenos involucrados del Block Caving, estos no se han entendido del todo (Rustan 2000). Particularmente, una de las características principales del método de Block Caving es el flujo de material fragmentado. Este concepto incide en los aspectos de diseño, operacional y de planificación del método.

Diversos autores han investigado el fenómeno de flujo gravitacional (Castro 2006; Castro 2009; Kvapil 1969; Heslop and Laubscher 1981; Laubscher 1994, 2000; Marano 1980; McCormick 1968. Pierce 2010; Power 2004). En la actualidad se puede clasificar el modelamiento del fenómeno, de acuerdo a su forma de análisis, en dos categorías, cinemático y dinámico. El modelamiento cinemático toma en cuenta relaciones físicas de la dinámica propia del movimiento de mineral, pero las traduce en reglas simples que permiten un análisis rápido y efectivo de la geometría del flujo gravitacional.

FlowSim es una herramienta de modelamiento cinemático del flujo gravitacional, realizada en base autómatas celulares. Desde su primera aparición (Castro 2007) se han realizado diversas validaciones y modificaciones (Miranda 2012, Valencia 2014, Gonzalez 2014, Fuentes 2015), validaciones en base a la comparación de la reproducción de datos de leyes y geometrías de la zona de flujo. El antecedente de calibración con datos mina de la mina Esmeralda (Fuentes 2015), solo toma en cuenta una fracción de la cantidad total de los trazadores recuperados, siendo el principal parámetro evaluador la forma del flujo, área de la zona de extracción. Se determina entonces la necesidad de calibrar el simulador con respecto a la totalidad de los trazadores recuperados y tomando como parámetro de análisis una variable cuantitativa, masa de extracción de los trazadores.

El desarrollo de esta memoria propone en primera instancia el estudio del fenómeno de flujo gravitacional, mediante el análisis del comportamiento de trazadores instalados en el sector Esmeralda de la mina El Teniente (propiedad de la empresa Codelco). Luego del análisis de datos, se procede a calibrar y posteriormente diagnosticar la precisión de FlowSim para representar las geometrías de flujo del sector en estudio. El diagnostico permite proponer mejoras que aumentaran la precisión de las predicciones de FlowSim.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo de la presente investigación es la evaluación y mejora de FlowSim como herramienta de simulación de flujo gravitacional, mediante el estudio de las zonas de extracción generadas por trazadores inteligentes ubicados en faena.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para cumplir con el objetivo general planteado se propone desarrollar las siguientes actividades:

Estudio de los parámetros de calibración del software FlowSim 3.0.

Estudio del efecto de la granulometría y carta de extracción sobre el desarrollo de la zona de extracción, mediante información de trazadores inteligentes.

Calibración FlowSim 3.0 con información de trazadores, tonelaje de salida de trazadores.

Evaluación de precisión de las simulaciones de las zonas de extracción.

Plantear incorporación de mejoras en FlowSim 3.0 en base a los resultados observados.

## **1.3 Alcances**

El análisis de FlowSim se hace sobre su versión más reciente.

El estudio del flujo gravitacional se efectúa tomando como referencia la información de trazadores ubicados dentro del bloque 2 de la mina esmeralda, sector comprendido entre la zanja 30 y 34 y las calles 57 y 59.

El análisis de las zonas de extracción se hace desde perspectiva del efecto que la granulometría y la carta de extracción tienen sobre este.

El análisis de la zona de extracción se hace tomando a la batea como unidad básica de estudio.

La representación gráfica de las zonas de extracción se hace en base a un algoritmo de interpolación lineal desarrollado en Matlab.

El análisis de la zona de extracción se efectúa tomando en consideración la información de los trazadores recuperados a la fecha.

El planteamiento de mejoras a implementar se hace desde un punto de vista conceptual.

## 1.4 Metodología

La metodología para el presente trabajo se basa en primera instancia en la interpolación de las geometrías de flujo mediante el software Matlab, posteriormente se estudia las causas de la obtención de dichas geometrías, tomando como principales variables el tiraje realizado y la granulometría. Se continúa la investigación con la calibración del software y la simulación de las bateas en análisis. El estudio de las simulaciones y su comparación con los datos mina permitirán observar las diferencias, plantear las razones de estas, e implementar herramientas que ayuden a minimizar estas discrepancias.

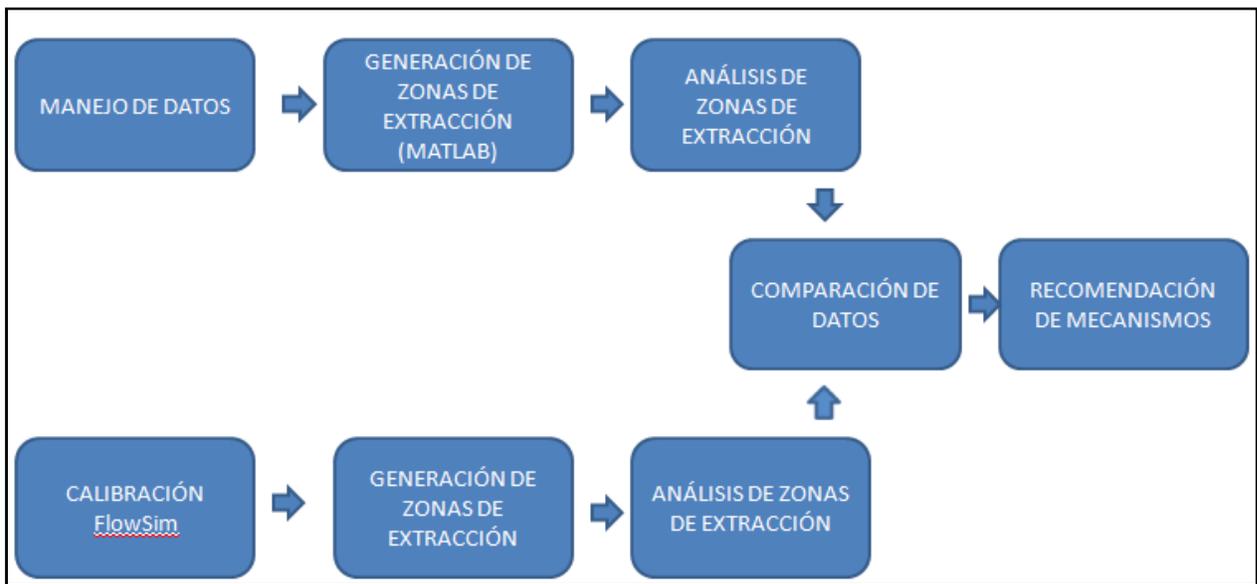


Figura 1-1: Metodología desarrollada durante la investigación.

## 1.5 Contenido por capítulo

### I. Estado del arte

En este capítulo se resume de forma sintética y crítica las principales investigaciones llevadas a cabo sobre la teoría de flujo gravitacional. Investigaciones en el contexto de experimentación física y modelamiento computacional. Además, se realiza una revisión detallada del simulador FlowSim.

### II. Antecedentes de la investigación

Este capítulo detalla los antecedentes necesarios sobre los cuales se desarrolla la investigación. Los antecedentes se resumen en:

Características del sector en estudio, Esmeralda Bloque 2.

Revisión de instrumentación de trazadores inteligentes, “Smart markers”.

Análisis de principales parámetros modelación de FlowSim.

### **III. Generación y análisis de resultados**

En este capítulo se analiza el comportamiento del flujo gravitacional para el sector en estudio. El análisis se efectúa mediante la información entregada por los trazadores, las respectivas cartas de extracción e historial de granulometría.

Posteriormente se realiza la calibración del simulador. La referencia de simulación es encontrar los parámetros del simulador,  $C_v$ ,  $N$  y  $M$  que mejor representen el tonelaje de salida de los trazadores.

El capítulo continúa con el estudio de la representatividad de las simulaciones. Luego de obtener el simulador calibrado se estudia el por qué de las diferencias respecto de los datos mina, análisis que es fundamental para el desarrollo del siguiente capítulo.

### **IV. Recomendaciones de nuevos mecanismos para el simulador y análisis conceptual.**

Luego de obtener los resultados del desempeño del simulador, en cuanto a la precisión del tonelaje de salida de trazadores y la forma de las zonas de extracción, se proponen mejoras que permitan minimizar los errores obtenidos.

### **V. Conclusiones y recomendación a futuro**

Este capítulo contiene las afirmaciones realizadas por el autor luego del desarrollo del trabajo.

# CAPÍTULO 2

## Antecedentes teóricos

En el presente capítulo se expone los antecedentes teórico-experimentales del conocimiento sobre flujo gravitacional. La revisión contempla un análisis crítico de las principales investigaciones llevadas a cabo en esta materia, al mismo tiempo que pone en manifiesto la necesidad de un mayor entendimiento sobre los mecanismos que rigen este fenómeno.

### 2.1 Flujo gravitacional

El fenómeno de flujo gravitacional es de suma importancia para el éxito o fracaso de una operación de Block/Panel caving, de acuerdo a una correcta caracterización de la geometría del flujo es que se puede definir las dimensiones del nivel de producción y hundimiento, además de establecer criterios para políticas de tiraje.

Los modelos físicos empleados para el estudio del fenómeno de flujo gravitacional, han ido desde aquellos hechos en dos dimensiones hasta modelos actuales en tres dimensiones. El material usado en primera instancia fue arena, para posteriormente utilizar grava como medio de análisis.

#### 2.1.1 Modelamiento experimental arena

Kvapil (1965) construye un modelo en dos dimensiones y utiliza como material de análisis arenas negras y blancas colocadas de forma estratificada. El modelo contaba con una abertura en la parte inferior por la cual se realizó extracción aislada (ilustración 2-1).

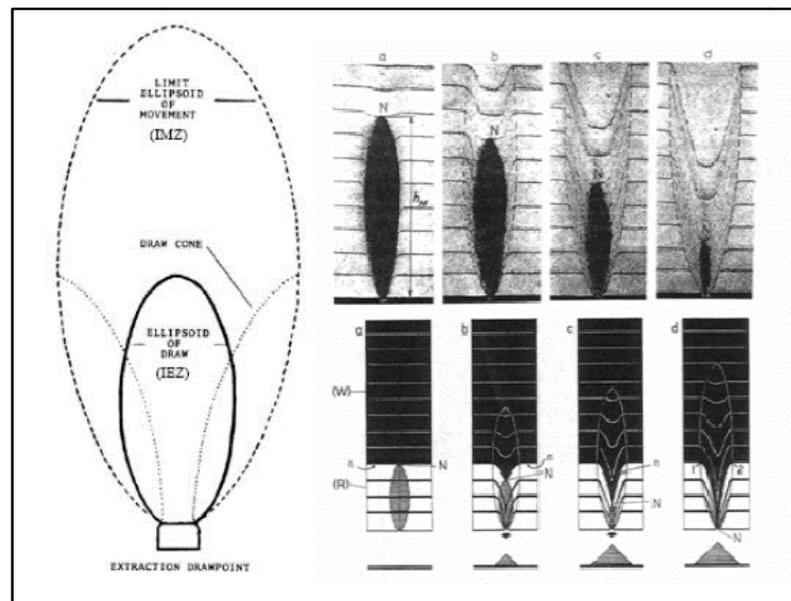


Figura 2-1: Evolución de la forma de la geometría de flujo, kvapil 1965.

A través de esta experimentación, Kvpil propuso la existencia de dos zonas dentro del flujo granular. La primera fue denominada elipsoide de movimiento (Movement Zone, MZ), esta zona está delimitada por el contorno que define el material que ha sido perturbado desde su posición original pero que no ha sido necesariamente extraído, y aquel que permanece sin cambio alguno desde su posición original. La segunda zona se denomina elipsoide de extracción (Extraction Zone, EZ), la zona de extracción está compuesta por todos aquellos fragmentos que han sido extraídos a través de la abertura de extracción.

Seguidamente, Kvpil llevó a cabo un estudio bajo extracción múltiple. El autor concluye estableciendo que, para la existencia de un tiraje regular sobre los puntos de extracción, estos deben estar separados una distancia menor o igual al ancho del elipsoide de movimiento.

Complementando estos hallazgos, Kvpil (1992) estableció la existencia de dos relaciones entre los elipsoides de extracción y movimiento. La primera fue que el volumen del elipsoide de movimiento es igual a 15 veces el de extracción, la segunda es que la altura del elipsoide de movimiento es igual a 2,5 veces la altura del de extracción.

El autor realizó un aporte significativo para el entendimiento del flujo gravitacional, sin embargo, el modelo presenta limitaciones que imposibilitan representar de buena manera el flujo de material. Entre ellas se pueden mencionar el material de análisis, arena, la escala del modelo, distribución granulométrica, forma de los fragmentos, resistencia del material y las 2 dimensiones del modelo.

Laubscher y Heslop (1981) y Marano (1980) McCormick (1968) llevaron a cabo experimentos en 3 dimensiones tomando arena como material de análisis, sus descubrimientos indican la existencia de una forma cilíndrica con un cono en la base de extracción. Laubscher y Heslop (1981) y Marano (1980), identificaron además que existía una zona de tiraje múltiple cuando se alcanzaba un solapamiento de los elipsoides de movimiento, solapamiento que se daba solo si el espaciamiento de los puntos de extracción era menor o igual a 1,4 veces el diámetro del elipsoide de movimiento, resultado sobre el que Laubscher fundamentaría su posterior modelo conceptual de flujo (Laubscher 2000).

Estos modelos tuvieron la misma limitación de Kvpil (1965-1992), al utilizar arena como medio de análisis. Por otro lado, fue una mejor representación a la de Kvpil (1965-1992), ya que consideró una forma tridimensional del modelo.

Los modelos de arena cumplieron una labor importante, al indicar los primeros lineamientos del fenómeno de flujo gravitacional. Sin embargo, las limitaciones de representatividad son su principal contrapunto. Las propiedades de la arena difieren de las del material de roca fragmentado, el ángulo de fricción de la arena es de  $35^\circ$  mientras que el de los fragmentos mina es en promedio  $45^\circ$ , más aun, la forma regular esférica no tiene relación con la angulosidad característica de los fragmentos mina.

### **2.1.2 Modelamiento experimental grava**

La representatividad de los modelos físicos de arena despertó el interés por experimentar con medios de análisis más acordes al material real. Esta idea se materializó con las sucesivas publicaciones realizadas (Peters 1984; Power 2004; Castro, 2006) en base a investigaciones con materiales más gruesos, roca triturada y grava. La tabla 2-1 resume las principales conclusiones encontradas por los autores mencionados.

Tabla 2-1: Resumen modelos físicos hechos en grava.

Resumen principales estudios		
Estudio	Material de análisis	Principales conclusiones
Peters (1984)	Roca fragementada	Diámetro de la zona de extracción es principalmente influenciada por el ancho del punto de extracción. La granulometría no tiene efecto en la geometría del flujo.
Power (2004)	Grava	Granulometría tiene incidencia en el alto y ancho de la zona de extracción/movimiento.
Castro (2006)	Grava	El ancho de la zona de extracción/movimiento es función de la masa y altura extraída. Fragmentos de menos tamaño tienen mayor movilidad dentro de la columna de extracción.
Kvapil (1965)	Arena	Definición de zonas de extracción/movimiento y geometría elipsoidal del flujo.
Kvapil (1992)	Arena	Cociente entre volumen del elipsoide de movimiento/extracción =15. Cociente entre altura de zona de Movimiento/ Extracción =2.5.
Heslop & Laubscher (1981)	Arena	Forma cilíndrica con un cono en la base en donde se localiza el punto de extracción. Espaciamiento para la obtención de tiraje interactivo 1.4 veces el diámetro del elipsoide de movimiento.

Tabla 2-2: Características modelos físicos hechos en grava.

Resumen características de principales estudios					
Estudio	Material de análisis	Largo (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Condiciones de tiraje
Peters (1984)	Roca fragementada	6	4.6	0.5	Tiraje múltiple/aislado
Power (2004)	Grava	2.2	3.5	2.1	Tiraje múltiple/aislado
Castro (2006)	Grava	3.3	3.4	2.4	Tiraje múltiple/aislado
Kvapil (1965)	Arena	-	-	-	Aislado
Kvapil (1992)	Arena	-	-	-	Múltiple
Heslop & Laubscher (1981)	Arena	2.4	0.76	0.76	Múltiple

### 2.1.3 Modelos empíricos

El modelo empírico de Laubscher (1994, 2000) es en la actualidad la herramienta de diseño minero ampliamente usada para la definición del espaciamiento entre los puntos de extracción. La metodología se basa en hallazgos encontrados sobre la interacción de múltiples puntos y reglas empíricas. El autor concluye que el ancho del elipsoide de movimiento está relacionado directamente con la granulometría esperada y el ancho del punto de extracción. Laubscher (2000) planteó la existencia de tres mecanismos que suceden dentro del proceso de extracción, flujo en masa, difusión de vacíos y flujo granular.

#### Flujo en masa

El flujo en masa se desarrolla en la parte superior del cuerpo mineralizado cuando se ha alcanzado un caving completamente desarrollado, la razón de este flujo se debe al solapamiento de elipsoides de movimiento de puntos adyacentes. En esta parte de la columna de material, las partículas se mueven preferentemente de forma vertical debido a un uniforme perfil de velocidad a largo de los puntos de extracción, de esta forma, las partículas no se ven influenciadas por la tasa de extracción de los puntos que componen el nivel de producción.

Más adelante, Susaeta (2004) concluye de igual forma sobre la existencia de un lugar dentro de la columna en donde se desarrolla un descenso uniforme del material. De igual forma, los experimentos de Kvapil (1965, 1996) y Marano (1968) también evidencian zonas con flujo preferencialmente vertical y uniforme.

A pesar de lo anterior, también se ha reportado la existencia de movimiento lateral (Heslop, 2010). El autor postula la existencia de presiones en los bordes laterales del material hundido, lo que causaría el movimiento de horizontal de algunos sectores.

### **Difusión de vacíos**

El mecanismo de difusión de vacíos fue planteado inicialmente por (Jolley 1968). El fenómeno de difusión de vacíos es generado por la extracción de mineral desde los puntos de recolección de material. La generación de vacíos se produce en mayor medida en los inicios del Caving, cuando los fragmentos exhiben mayores dimensiones e irregularidades, características que imposibilitan la forma de un elipsoide. El fenómeno de difusión de vacíos es ampliamente usado en el modelamiento matemático del flujo gravitacional. El fenómeno es acorde con las observaciones en terreno.

### **Flujo granular**

Se denomina flujo granular a la forma del flujo de extracción que se desarrolla en la zona inferior de la columna. La geometría de extracción en esta parte de la columna se ve apreciablemente influenciada por movimientos laterales, producto de la acción de esfuerzos dinámicos relacionados a la superposición de los elipsoides de movimiento de puntos de extracción adyacentes.

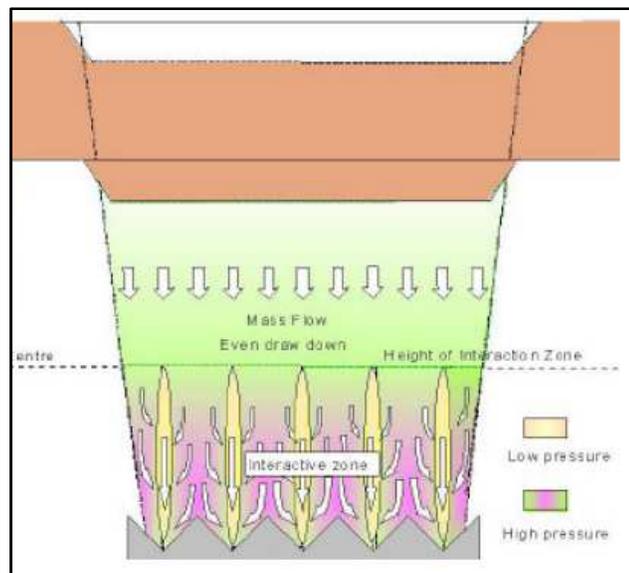


Figura 2-2: Modelo conceptual Laubscher (2000). En la ilustración se observa la zona de flujo en masa y flujo granular.

## **Punto de entrada de dilución (PED)**

El punto de entrada de dilución (PED) se define como el porcentaje de la columna de mineral extraída antes que la dilución aparezca en el punto de extracción analizado (Laubscher, 1994). El PED es función de la proporción de mezcla de material que ocurre en la columna mientras se realiza la extracción y a la vez, la mezcla es función de parámetros como la altura de columna, granulometría, espaciamiento entre puntos de extracción y la diferencia de tonelaje extraído entre puntos activos.). Los principales parámetros que afectan la entrada de dilución son:

- Razón volumen de mineral y área de contacto mineral-diluyente: Mientras mayor sea la razón entre el volumen de mineral y el área de contacto mineral-diluyente, menor será el contenido total de dilución extraído.
- Disposición y forma de la interfaz mineral-diluyente: Mientras más irregular e inclinada sea la interfaz, mayor será el contenido de dilución en la mezcla extraída comparado con el caso de una interfaz lateral vertical y de geometría regular.
- Diferencia entre la fragmentación del mineral y el material diluyente: Mientras más fina sea la fragmentación del material diluyente comparada con la del mineral, mayor será el contenido de la dilución en la mezcla y más temprana será la entrada del material diluyente al punto de extracción.
- Distribución de leyes en el material diluyente: En caso de existir zonas de altas leyes entre el material diluyente, un mal muestreo podría conducir a generar una sobre extracción de las columnas, produciendo una mayor entrada de material diluyente al punto de extracción.
- Interacción de los elipsoides de extracción y dirección del flujo: Mientras mayor sea la interacción entre elipsoides de extracción, habrá una entrada de dilución más tardía y en menor cantidad. De forma inversa, mientras mayor sea el espaciamiento entre los elipsoides, mayor será la probabilidad de extraer un alto contenido de dilución si no se realiza un control de tiraje adecuado.
- Diferencia entre densidades de mineral y material diluyente: Mientras mayor sea la densidad del mineral en comparación con la del material diluyente, menor será el contenido de dilución extraído y viceversa.
- Variante de hundimiento por bloques o paneles: Si la extracción se realiza a través de block caving en forma de pequeños bloques, la dilución lateral será mucho mayor que en una estrategia de panel caving.

A partir de la evidencia experimental y la interpretación de esfuerzos alrededor de las excavaciones en operaciones de hundimiento, Laubscher (2000), propone una metodología para determinar el diseño que asegure un tiraje interactivo a cierta altura de interacción (HIZ) y así retrasar el ingreso de dilución. Esta metodología fue plasmada como un ábaco que considera como variables el diámetro de tiraje aislado, el espaciamiento mínimo y máximo entre puntos de extracción, y la calidad del macizo rocoso (RMR y frecuencia de fractura por metro).

Laubscher evalúa el control de tiraje, en forma de bloques o paneles, mediante determinación del factor de control de tiraje (dcf). Este parámetro se basa en la estimación de la variación de los tonelajes de los puntos de extracción (variación estándar). El ajuste se utiliza para corregir la entrada de dilución frente a buenas o malas prácticas de tiraje.

Laubscher considera la altura de columna ( $H_c$ ), la altura de interacción ( $HIZ$ ), el dcf y el esponjamiento de la roca según sea su granulometría (fina, media o gruesa), para plantear una relación de cálculo del PED:

$$PED = \frac{(H_c.S - HIZ).dcf}{H_c.S} \cdot 100(\%) \quad (2.1)$$

La metodología propuesta por Laubscher permite establecer el PED de forma determinista. El PED también suele llamarse PEQ (punto de entrada de quebrado) en algunos estudios sobre migración de finos hechos en las minas El Teniente y El Salvador. El material quebrado es aquel mineral fragmentado obtenido de la explotación previa de los niveles más superficiales, material que es susceptible de ser extraído en niveles de producción inferiores.

#### **2.1.4 Simuladores de flujo gravitacional**

La necesidad del entendimiento más detallado del flujo gravitacional, en conjunto con la mayor capacidad de procesamiento de datos, son las condiciones que propiciaron la creación de los simuladores de flujo gravitacional basados en modelos matemáticos.

En la actualidad existen dos métodos de simulación de flujo gravitacional, modelamiento cinemático y dinámico.

##### **Modelos cinemáticos**

Los modelos cinemáticos buscan reproducir el movimiento del material granular, sin entrar en detalle sobre el carácter dinámico subyacente del movimiento. Los simuladores de este tipo se pueden dividir en estocásticos y aquellos de carácter empírico-analítico.

##### **Modelos estocásticos o autómatas celulares**

El autómata celular corresponde a la formulación matemática de ambientes naturales que pueden ser representados por la evolución de sistemas de elementos en pasos discretos, dicha evolución temporal se estima a través de las interacciones locales de estos elementos.

La primera aproximación a estos modelos fue realizada por parte de Litwiniszyn (1956) y Mullins (1956) diversos autores han realizado sucesivas investigaciones desde entonces, entre ellos se encuentran Calderon et al (2004), Alfaro 2002, Castro (2006), Power (2007).

Este tipo de modelos siguen una lógica común de micro reglas que actúan de forma local, no consideran los mecanismos reales que toman parte en los procesos dinámicos entre partículas, y debido a interacción partícula – partícula se extienden a la totalidad del modelo.

La hipótesis general que rige este tipo de simuladores es que el material es movilizad por la extracción de material desde la parte inferior del modelo. El movimiento de partículas puede ser estimado a partir de una función de probabilidad y restricciones locales. Estudios en torno a los autómatas aplicados en minería se plantean en Sharrock et al (2004) y Castro y Whiten (2007)

El autómata celular consiste en un arreglo regular de celdas de igual tamaño, que tienen un conjunto finito y discreto de estados posibles. Estos estados se actualizan de manera discreta en el tiempo, de acuerdo a reglas que dependen exclusivamente del estado de la vecindad de las celdas (Castro 2006).

El autómata celular se define mediante cuatro características principales:

- **Espacio:** La unidad básica de representación espacial es la célula, las células pueden arreglarse como rejillas o cuadrículas regulares en tantas dimensiones como sea necesario.
- **Estado:** Cada célula puede tomar un valor a partir de un número finito de estados.
- **Vecindad:** se denomina así al conjunto de células que interactuaran con una determinada célula en análisis.
- **Función de transición:** Es una función aplicada a la totalidad del espacio, esta función permite conocer el estado de una determinada célula en el siguiente paso de tiempo, para efectuar esto, la función de transición se basa en valores de la célula en cuestión en conjunto con el de sus vecinos. Esta función se aplica para cada paso de tiempo sobre todas las células del espacio, este concepto también es llamado regla de evolución del autómata.

La ventaja de este tipo de modelamiento es su simpleza y eficiencia, relación calidad-tiempo, mientras que su principal desventaja es que utiliza parámetros que no son directamente relacionados al material de análisis, además, el método solo resuelve el carácter cinemática del flujo gravitacional (Kozicki y Tejchman, 2005).

### **Modelos empíricos-analíticos**

Estos modelos de flujo gravitacional se diferencian de los anteriores en su formulación. Las reglas que modelan el flujo son ecuaciones matemáticas que interpretan las interacciones que tienen lugar en su desarrollo. Los modelos que tienen mayor preponderancia en la actualidad son aquellos utilizados por los softwares PC/BC (Geovia) y Rebop (Itasca).

**PC/BC (Panel caving/ Block caving):** El software es en la actualidad ampliamente usado para los procesos de planificación y control de la producción minera en minas de block/panel Caving. El programa basa sus predicciones en reglas empíricas y datos históricos de la mina particular en análisis. El programa no intenta predecir el movimiento particular de los fragmentos de material, ni tampoco pretende predecir la evolución del perfil de velocidad. El Software utiliza reglas empíricas (Laubscher 2000) para el proceso de mezcla y migración de finos a través de la columna en el intervalo previo a alcanzar el flujo en masa. Toma como consideración fundamental que existe flujo en masa y que este se desarrolla a partir de una altura de interacción, la cual se debe pasar como variable de entrada. El programa requiere para su evaluación la previamente mencionada altura de interacción, el máximo ancho de la zona de movimiento, un factor de control de tiraje y la definición de atributos para la percolación de finos. A pesar de que lo anterior limita la robustez del código, el programa ha sido de gran ayuda y es extensivamente usado en gran número de operaciones en donde existen datos para la calibración.

**REBOP: (Rapid Emulator Based On PFC)** es un programa que simula el flujo basado en aproximaciones matemáticas que modelan las condiciones de movimiento que existen en el desarrollo del flujo. El programa toma en cuenta las conclusiones realizadas por Kvapil (1965). Es así que diferencia dos zonas, una zona sin perturbaciones fuera de la elipse de movimiento

(IMZ), y aquella comprendida por la elipse de movimiento. De acuerdo a esta zonificación ReboP permite predecir mediante la estimación de un pseudo perfil de velocidad, el desplazamiento de las partículas dentro de la zona de movimiento. ReboP estima el aumento temporal del volumen del elipsoide de movimiento (IMZ) con dos mecanismos fundamentales, mecanismo de colapso y erosión. Al igual que en el modelo estocástico, la generación y expansión de la zona de movimiento es debido al ascenso de vacíos originados por la extracción de material (Lorig and Cundall 2000). El programa aproxima la geometría de los elipsoides de movimiento a través de su discretización en tajadas horizontales, ver ilustración 2-3. Esta discretización permite evaluar el ángulo entre tajadas, variable fundamental que determina la proporción que cada mecanismo, colapso y erosión, ocupará sobre el vacío en análisis.

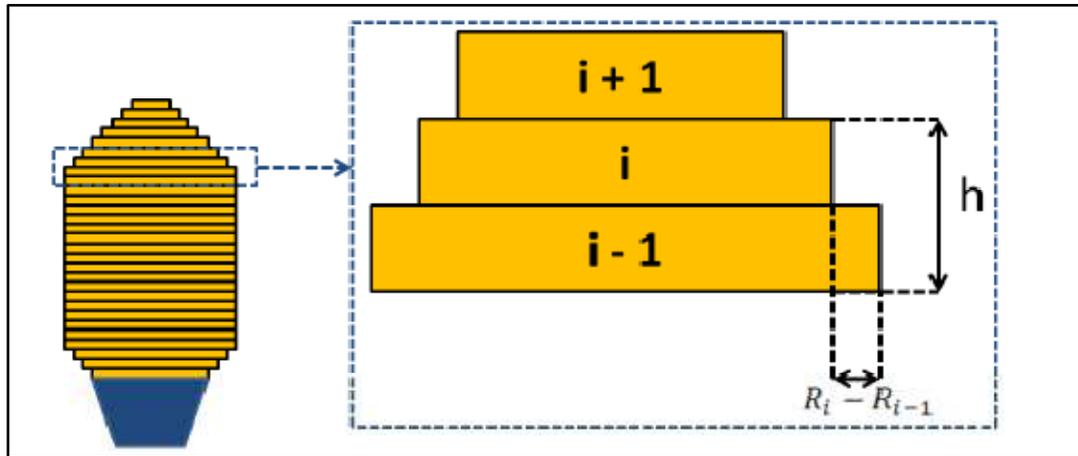


Figura 2-3: Discretización del elipsoide de movimiento (IMZ) realizado por ReboP.

$$\beta_i = \frac{R_i - R_{i-1}}{h} \quad (2.2)$$

El ángulo de desplome tiene directa relación con la cantidad de material colapsado y erosionado que ocupara al vacío en análisis.

El ángulo de desplome varía desde un valor límite negativo, desde donde la erosión toma el 100% del volumen del vacío, hasta un ángulo positivo límite a partir del cual existe erosión  $\beta_{max}$ .

$$\beta_{max} = \tan\left(\phi + \frac{45}{2}\right) \quad (2.3)$$

## Modelos dinámicos

Los modelos dinámicos son formulaciones matemáticas que buscan explicar el comportamiento de las partículas bajo flujo, a través de ecuaciones deterministas derivadas de la mecánica clásica.

Los modelos dinámicos basan sus resultados en la codificación y resolución de ecuaciones diferenciales. Dichos resultados son importantes, ya que presentan una estimación exacta de los mecanismos que toman lugar en el flujo de partículas. Sin embargo, su uso es limitado debido al

largo tiempo de procesamiento y la poca cantidad de elementos con los que se puede trabajar (Brown 2003).

El software más relevante de este tipo de modelo es PFC3D (Particle Flow Code in 3 dimensions). El software considera el movimiento de las partículas y las interacciones que suceden bajo la óptica de las leyes de movimiento y el contacto entre partículas.

Tabla 2-3: Principales ventajas y desventajas de los programas de simulación gravitacional.

	Ventajas	Desventajas	Antecedentes de uso
PCBC	Data de calibración fácil de obtener Rapidez de las evaluaciones	PED, HIZ y Velocidad definidos por el usuario Solo se han validado las leyes obtenidas	Codelco Division El Teniente
Rebop	Considera ángulo de fricción, Cave Back y granulometría Rapidez de las evaluaciones	Solo se han validado las leyes y geometrias obtenidas	Chuquicamata Subterránea
FlowSim	Considera Geometría de la elipse Considera diferencias de movilidad entre distintos materiales Rapidez de las simulaciones	Solo se han validado las leyes y geometrias obtenidas	Andina tercer panel extendido Mina El Salvador
PFC	Utilización de la mecánica clásica para la predicción de movimiento	Limitación de número de partículas evaluadas	Solo usado en modelos acotados

## 2.2 FlowSim simulador cinemático de flujo gravitacional.

### 2.2.1 Breve cronología

FlowSim como aplicación para la minería de Block/Panel Caving es presentado en su primera versión, FlowSim 1.0, por Castro y Whiten (2007). Los autores destacan la ventaja del soporte computacional requerido, el programa puede ser implementado en computadores de uso común, con tiempos de procesamiento significativamente menores a los utilizados por los simuladores dinámicos. El simulador fue descrito por primera en la plataforma Matlab.

FlowSim 1.0 es calibrado y validado en primera instancia mediante los datos del modelo físico de Castro (2006). El simulador busca reproducir los efectos del flujo gravitacional en términos macroscópicos y no a nivel de partícula, haciendo de FlowSim, una herramienta de diseño y planificación minera de largo plazo.

Siguiendo con el desarrollo del simulador Castro (2009) realizó un estudio para comparar los datos a nivel industrial y los resultados obtenidos por el simulador, FlowSim 1.0. El análisis se llevó a cabo con datos obtenidos de dos faenas de la empresa Codelco, Mina el salvador (Inca Norte) y división el Teniente (sector Esmeralda), operadas mediante el método de Panel Caving. Castro (2009) recomienda FlowSim como herramienta de simulación y planificación bajo la restricción de simular sectores acotados. La principal limitación que FlowSim exhibía era la capacidad de procesamiento, el simulador aumentaba notoriamente el tiempo de simulación cuando se analizaban amplios sectores de producción.

Con el objetivo de ampliar la capacidad de procesamiento del software, Miranda (2012) tradujo el algoritmo en C++, generando FlowSim 2.0. Esta versión fue más robusta y eficiente, permitiendo simular mayor cantidad de puntos a tiempos de simulación menores a los exhibidos por FlowSim 1.0.

Valencia (2014) complementó las funcionalidades del simulador, proponiendo para este efecto tres nuevos mecanismos, Rilling, Cave Back, y flujo preferencial, estos mecanismos fueron implementados en dos dimensiones en la plataforma Matlab. Valencia (2014) concluye que la capacidad predictiva de FlowSim es mejor entendida cuando se evalúan las variables de salida en términos macroscópicos en lugar de escalas puntuales, esta aseveración se fundamenta en los errores residuales de hasta 30% de PED (punto entrada de dilución) obtenido por el autor.

Gonzalez (2014) desarrolló FlowSim 3.0. Esta nueva versión cuenta con el algoritmo de flujo preferencial en tres dimensiones, propuesto anteriormente por Valencia (2014), además de la implementación de un algoritmo de colgaduras el cual obtuvo resultados aceptables. Gonzales (2014) concluyó luego de simular el sector Inca central Este de la mina El Salvador y evaluar el PEQ, que FlowSim 3.0 permite trabajar sobre una mayor cantidad de puntos de extracción, pero se debe mantener la perspectiva global de análisis, ya que el error residual de esta variable fue de 40%. El autor destaca además el aumento del tiempo debido a la incorporación del mecanismo de flujo preferencial.

Fuentes (2015) calibró y validó el modelo a través de la información de trazadores de análisis incorporados al bloque 2 del sector Esmeralda, División El Teniente. El autor calibró el modelo en base a la zona de extracción de una batea, batea compuesta por los puntos E5730F y E5930H, para luego validar el simulador mediante la medición de la variable PEQ en los modelos físicos de Vergara (2016). El programa entregó resultados cuantitativos y cualitativos, a escala de modelo físico (Vergara 2016) e industrial (bloque 1 y 4 sector Esmeralda, División el Teniente) respectivamente, obteniendo resultados aceptables. Es así que el autor obtiene un error máximo residual del PEQ de 29%. Bustamante (2015) incorpora al simulador el mecanismo de rilling planteado anteriormente por Valencia (2014). El autor mantiene la perspectiva de análisis, enunciada también por autores anteriores, sobre el carácter macroscópico de los resultados del simulador y que la comparación punto a punto es más bien de carácter referencial.

### **2.2.2 Caracterización de FlowSim**

Como se mencionó anteriormente FlowSim es una aplicación de autómatas celulares al modelamiento de flujo gravitacional de material granular. El espacio de trabajo sobre el cual modela FlowSim es una representación tridimensional de bloques de igual tamaño, cada uno de estos bloques, también llamados células, posee atributos del macizo rocoso a simular tales como densidad, competencia geomecánica, ley y litología. Cada una de las células del modelo se caracteriza por los siguientes atributos.

Espació o tamaño: Este valor es introducido por el usuario, ya que el tamaño incide directamente sobre el tiempo de simulación, de este modo su definición debe basarse en una mezcla criteriosa de eficiencia y tiempo.

Estado: Cada célula puede situarse en tres estados posibles,

- Granular: Este estado le confiere a la célula la capacidad de movimiento, es decir, la capacidad de interactuar con los vacíos generados debido al proceso de extracción.
- Solido: El estado sólido es definido dentro del sistema para representar las superficies estructurales que posibilitan el proceso de extracción, bateas, pilares, zanja de extracción entre otros.

- Vacío: El vacío es un estado fundamental sobre el cual se sustenta el modelamiento del flujo. El ascenso de vacíos permite que el material granular pueda fluir y ser extraído desde el punto de extracción.

Función de transición: la función de transición es la directriz lógica que permite la selección del bloque granular que descenderá debido al análisis de un vacío en ascenso. En FlowSim existen dos tipos de función de transición según sea la naturaleza de esfuerzos del bloque en análisis, con confinamiento o sin confinamiento. La primera función tiene lugar sobre la columna de mineral durante el proceso de extracción, la segunda se aplica sobre los bloques sin confinamiento, es decir, aquellos ubicados en la proximidad de la superficie topográfica y aquellos bajo la visera de la batea de extracción.

Vecindad: La vecindad es el criterio del número de bloques adyacentes que se tienen en cuenta para el análisis de un bloque en transición.

El proceso de simulación llevado a cabo por FlowSim se produce debido al ascenso de vacíos generados por la extracción de material desde la parte inferior del modelo. El parámetro que controla el ascenso de un vacío es  $C_v$ . <sup>threshold</sup> dicho parámetro fija la condición mínima de vacíos que deben rodear al vacío de referencia para permitir que este ascienda. Por otro lado, es importante destacar que el parámetro  $C_v$  es una medida directa de la porosidad esperada del flujo de material.

$$N_{vacios} \geq C_v \quad (2.4)$$

Sea el bloque en análisis  $a_{ijk}$ , el estado de un bloque se define a través de un código binario, 1 si el bloque es vacío, 0 si el bloque es granular. De esta forma, el recuento del número de vacíos alrededor del bloque en análisis se puede modelar de la siguiente forma:

$$\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=1}^2 a_{ijk} \geq C_v \quad (2.5)$$

Obtenida una cantidad de vacíos mayor a  $C_v$ , el proceso sigue con la selección del bloque granular del nivel superior (Nivel K+1) que intercambiará estado con el vacío en análisis (Nivel K).

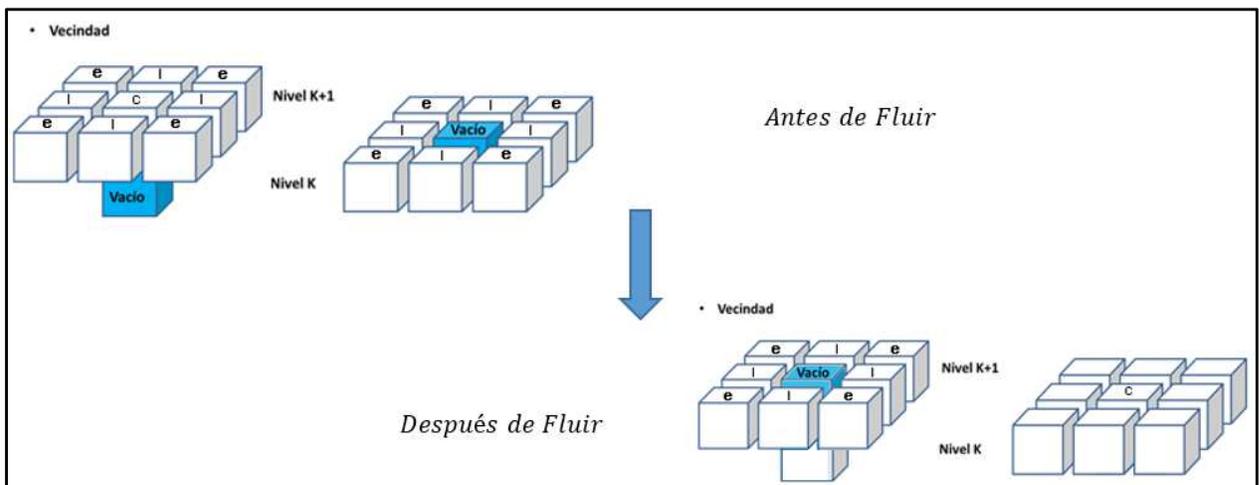


Figura 2-4: Diagrama explicativo del proceso de selección del bloque del nivel superior que se transformara en vacío.

Con el propósito de lograr lo anterior, FlowSim evalúa cada uno de los nueve bloques sobre el vacío en análisis, ver figura 2-4, para estimar de esta manera el bloque que descenderá. La

formulación toma en cuenta la calidad geomecánica (RMR) y la distancia de cada bloque al vacío en análisis. Con respecto a la distancia, el bloque más cercano tendrá mayor probabilidad de fluir, del mismo modo, el bloque con menor RMR tendrá mayor probabilidad de fluir hacia el nivel inferior y ocupar el vacío en análisis. Para decidir el orden con que se evaluarán los vacíos de un nivel, FlowSim realiza la técnica de Montecarlo. La ecuación 2.6 muestra la formulación matemática de la función de transición.

$$p_i = \frac{d_i^{-N} * RMR_i^{-M}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-N} * RMR_k^{-M}} \quad (2.6)$$

$p_i$ : Probabilidad de descender del bloque “i”.

$d_i$ : Distancia del bloque granular al vacío en análisis.

$RMR_i$ : Calidad geomecánica del bloque i.

$N$  y  $M$ : Coeficientes del inverso a la distancia y calidad geomecánica respectivamente.

Los parámetros  $N$  y  $M$  son factores de ajuste que deben ser calibrados con datos de zonas de extracción de la faena en particular de análisis, estos parámetros varían de acuerdo a las propiedades de cada material.

### 2.2.3 Principales inputs de FlowSim

Para llevar a cabo el proceso de simulación en FlowSim, el usuario debe definir las características geométricas de los puntos de extracción, dimensiones de batea, ángulos de batea y ubicación. De igual forma, el software requiere la introducción de las variables operacionales del sistema a evaluar, carta de extracción y modelos de bloques. A continuación, se esquematiza en la figura 2-5 las variables geométricas necesarias para la configuración de FlowSim.

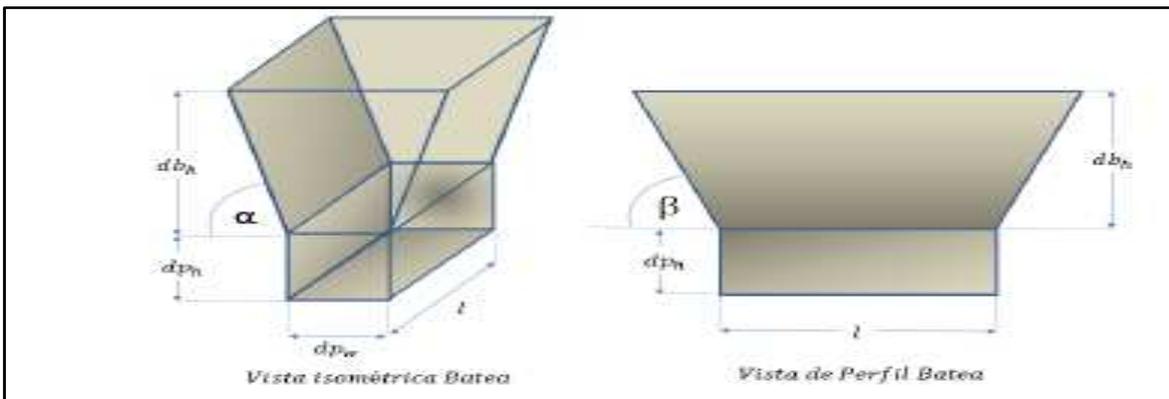


Figura 2-5: Parámetros Input para crear la geometría de las bateas.

Donde,  $\alpha$  ángulo frontal,  $\beta$  ángulo lateral,  $dp_h$  altura del punto de extracción,  $db_h$  altura de la batea.

## 2.2.4 Mecanismos implementados en FlowSim

### Flujo preferencial

El mecanismo de flujo preferencial fue propuesto por Valencia (2014). En esa ocasión el autor implementó el algoritmo para dos dimensiones sobre la plataforma Matlab. Posteriormente, Gonzalez (2014) extendió el código a tres dimensiones, he implementó definitivamente el código al software. El autor determina que el mecanismo permite disminuir el error de predicción del PED, sector Inca Central Este de la mina El Salvador, pasando de 65% a 42 % sin flujo preferencial y con flujo preferencial respectivamente. El mecanismo de flujo preferencial basa su aplicación en las características que el parámetro  $m$  le confiere a la función de probabilidad, ya que, este parámetro,  $m$ , permite atribuir mayor/ menor probabilidad de acuerdo a un menor/mayor RMR del bloque bajo análisis, tal como se puede observar en la ecuación 2.6.

### Rilling

Se conoce como rilling al fenómeno que ocurre en la superficie de la zona de estudio (modelo de bloques) una vez que el caving ha conectado superficie. El mecanismo de rilling es básicamente un reordenamiento de los bloques superficiales, debido a la necesidad de un nuevo equilibrio producto de la perturbación por la extracción. El software itera el reordenamiento de bloques en base a cumplir el ángulo de reposo de material ( $\emptyset$ ). A continuación, se observa la mejora luego de implementar este mecanismo por Bustamante (2015). El autor luego de implementar este mecanismo y evaluarlo en el modelo físico de Vergara (2016), concluye que las superficies generadas con y sin rilling muestran errores en la predicción del ángulo de subsidencia de 2% y 40% respectivamente, evidenciando de este modo la utilidad del mecanismo.

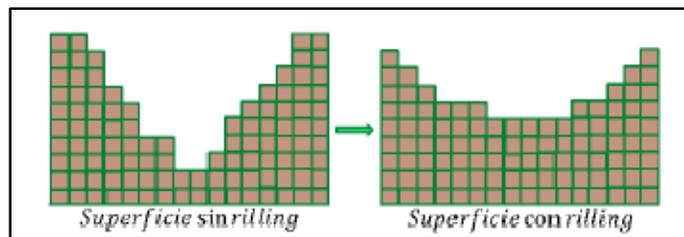


Figura 2-6: Contraste de FlowSim sin mecanismo (izquierda) y con mecanismo (derecha).

## 2.3 Estudios a escala mina con trazadores

La prueba con trazadores en ambientes directos de faena, resulta fundamental para el entendimiento de los mecanismos que toman parte en el fenómeno de flujo gravitacional. Es sabido que los modelos físicos (Peters 1984, Rustan 1990) reproducen el proceso mediante el cual se extrae el mineral de manera limitada, siendo así el estudio a escala real mina muy importante. La importancia de este tipo de investigaciones es evidente, no obstante, su desarrollo se ha visto limitado, debido a los costos técnico-económicos de su implementación, costos perforación y posicionamiento, costos de instrumentación y costos relacionados a la intervención de los procesos productivos de faena, entre otros. Sin embargo, a pesar de las limitaciones de su desarrollo, se han hecho esfuerzos para contar con esta parte valiosa de información sobre flujo gravitacional. Las principales investigaciones de este tipo se han realizado sobre minas de sublevel Caving más que en minas de Block/Panel Caving, debido en parte a la facilidad de

colocación de trazadores, y la mayor densidad de trazadores que se puede alcanzar. A continuación, en las tablas 2-3 y 2-4 se presentan los principales estudios llevados a cabo en Sublevel Caving y Block Caving respectivamente.

*Tabla 2--4: Principales estudios sobre flujo gravitacional para faenas de Sublevel Caving.*

Grangesberg ( Janeiled 1972)	Estudio exhibe zonas de tiraje asimétricas.
Kiruna (Gustafsson 1998, Quintero et al 2001)	El estudio muestra zonas de tiraje irregular.
Ridgeway SLC (Power 2004)	Zonas de tiraje estrechas e irregulares
Perseverance (Hollins y Tucker 2004)	
Ernest Henry (2016)	Zonas de flujo irregular y estrechas

*Tabla2-5: Principales estudios sobre flujo gravitacional para faenas de Block/Panel caving*

Ridgeway deeps (Power 2009)	Zonas de extracción irregular con flujos preferentes.
Esmeralda (Garcés 2015)	Zonas de extracción regulares.

### **2.3.1 Ridgeway deeps investigación de trazadores**

Ridgeway deeps mine se encuentra ubicada aproximadamente a 250 km al oeste de Sydney, Australia. Operada por la empresa minera Newcrest, la operación surge como una variante de la explotación previa del cuerpo mineral, realizada mediante el método de sublevel caving. La producción inicio el año 2010 y se estimó en 10 años el tiempo total de explotación, a un ritmo promedio de 17 t/d; esperando extraer durante este tiempo 1.6 Moz de oro y 0.21 Mt de cobre. La socavación realizada para inducir el hundimiento fue mediante la metodología de hundimiento avanzado. La socavación se inició desde la parte nor- este de la mina y se fue desarrollando hacia el sur-oeste.

#### **Ubicación de trazadores y área de estudio**

Los trazadores se ubicaron en tres principales áreas: al Este (524 trazadores), Centro (1291) y Oeste (112) del macrobloque mineral. Los marcadores fueron instalados en perforaciones radiales desde el nivel de hundimiento (cota 4804), con un máximo largo de 30 m; y perforaciones verticales descendentes desde los niveles 5040, 5070 y 5010 de la explotación de sublevel caving previa, máximo largo de 250 metros.

La zona central reportó ser la más representativa del cuerpo mineralizado, ya que se encontraba localizada dentro de la roca dominante (volcánica), razón por la cual se estudió en más detalle. Debido a la poca extracción solo se analizaron los trazadores posicionados desde la cota 4804, denominando a estos como trazadores de campo cercano.

Los trazadores se ubicaron a través de 5 abanicos de perforaciones radiales verticales desde el nivel de hundimiento (cota 4804), los abanicos tenían un espaciamiento de 10 metros y fueron orientados de forma perpendicular a las calles de producción. Cada abanico contenía 24 perforaciones, cada perforación de largo promedio 20 metros, dentro de cada perforación los trazadores fueron espaciados en 2 metros. Mediante las especificaciones antes mencionadas se

logró cubrir 3 bateas como área de estudio. La figura 2-7 detalla el posicionamiento de los trazadores, particularmente se observa el área de análisis, región central.

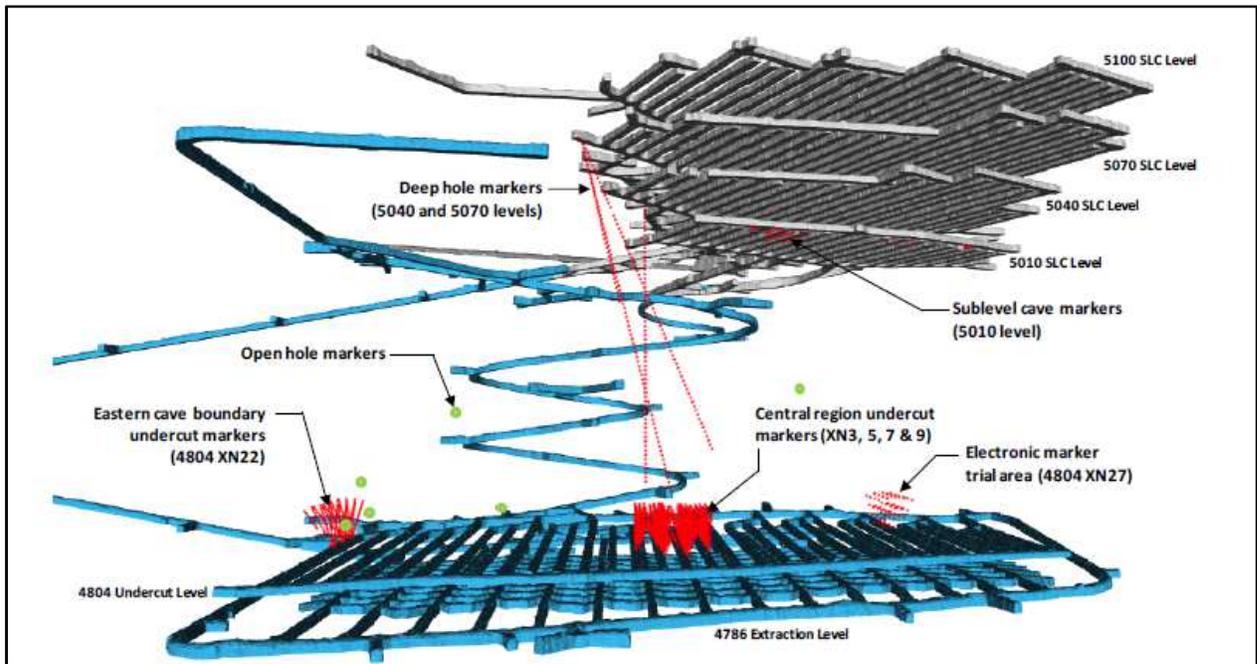


Figura 2-7: Vista isométrica ubicación de trazadores inteligentes en la mina Ridgeway.

## Metodología de la investigación

El objetivo de la investigación fue estudiar el flujo de mineral y reportar las características más relevantes, así como los mecanismos importantes del fenómeno. Con este fin se investigó el tonelaje de salida de cada trazador, para poder observar las zonas de extracción desarrolladas, a través de una escala de tonelaje.

Para el análisis del tonelaje de salida de trazadores, se realizaron 5 perfiles sobre las 3 bateas en estudio. Los perfiles fueron espaciados en 9 metros y orientados de forma perpendicular al pilar mayor, más específicamente, 3 quedaron posicionados al centro de cada batea mientras que los 2 restantes a través del pilar menor de la intersección de las mencionadas bateas, ver figura 2-8.

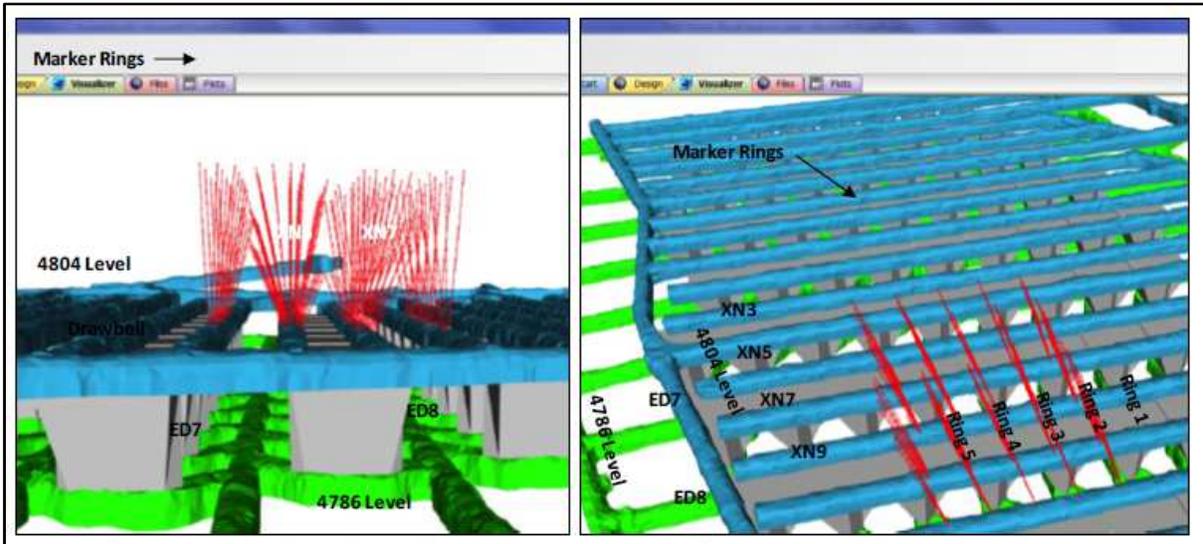


Figura 2-8: Posicionamiento de trazadores en la zona central, zona más representativa.

Para la asignación del tonelaje de salida de cada trazador se tomó en consideración dos criterios: 1) el tonelaje de salida del trazador provenía del punto de extracción más cercano a la ubicación inicial de dicho trazador. 2) el tonelaje asignado a un trazador es aquel que se reportó por el punto de extracción en la fecha de recuperación de dicho trazador. De estas consideraciones, la primera es muy restrictiva, ya que restringe la movilidad real de los trazadores; la segunda definición se observa objetiva.

Para la definición de cuales trazadores se tomarían en cuenta para cada perfil, se estableció un límite de influencia de 4.5 metros en cada uno de los perfiles.

En la figura 2-9 se muestran los resultados para los 5 perfiles.



## 2.4 Conclusiones

En el presente capítulo se describe y analiza los trabajos más importantes y destacados hechos sobre el fenómeno de flujo gravitacional.

En primera instancia se estudia los principales aportes obtenidos desde la experimentación física. Esta metodología de investigación consigue modelar la geometría de flujo gravitacional y caracterizar los principales parámetros que rigen su forma y evolución. Los Parámetros uniformidad de tiraje, granulometría y características del material son los que toman mayor preponderancia y rigen la geometría del flujo. Sin embargo, debido a las limitaciones propias de estos modelos: escala geométrica, medio de análisis (grava, arena) y temporalidad, por nombrar los más importantes, se hace necesario mayores estudios in situ de la preponderancia de estos mecanismos en el desarrollo del fenómeno.

Luego del estudio de los modelos de flujo gravitacional se analizaron las principales investigaciones llevadas a cabo en ambientes mineros reales. La revisión evidenció el poco trabajo realizado en este tipo de locaciones, siendo los más importantes lo hecho Power (2009) y Garcés (2015).

Ambos estudios difirieron sobre sus resultados, el primero encontró zonas de extracción irregulares fuertemente influenciadas por la granulometría del material obtenido; mientras que el segundo obtuvo zonas de extracción regular influenciadas no solo por la granulometría, sino también por el tiraje aplicado.

La revisión de antecedentes académicos sobre flujo gravitacional, continúa con el detalle de las principales metodologías de modelamiento del fenómeno. El modelamiento computacional permite evaluar diversos escenarios de flujo, de tal forma de predecir su comportamiento y evolución. FlowSim se presenta como una herramienta de simulación eficiente y de buena predicción. FlowSim cuenta con la internalización de mecanismos de rilling, flujo preferencial y porosidad; además el simulador cuenta con parámetros de calibración que permiten reproducir la geometría del escenario particular de análisis.

En el presente estudio se realiza el análisis de las zonas de extracción obtenidas de acuerdo a los datos de los trazadores posicionados en el bloque 2 de la mina Esmeralda. Garcés (2015) presenta el análisis de las zonas de extracción obtenidas mediante los trazadores recuperados, y confecciona un modelo conceptual de flujo gravitacional para el campo cercano en base al tiraje y granulometría. Sin embargo, Garcés (2015) toma en cuenta el carácter local del tiraje, solo analiza la extracción de los puntos de las bateas en estudio, dejando fuera el efecto sobre el flujo y la granulometría de los puntos de extracción vecinos. Garcés (2015) caracteriza la forma de extracción a través de la evolución de las diferencias de las cartas de tiraje de los puntos. La presente investigación toma en cuenta entonces el tiraje de los puntos vecinos y el tiraje de los puntos que componen las bateas, a través de un índice ampliamente usado en las operaciones mineras actuales, índice de uniformidad vectorizado (Susaeta 2004). En conjunto con las cartas de extracción se estudia de igual forma la granulometría. Posteriormente, se evalúa si los efectos de estas variables son modeladas de buena forma por el FlowSim.

Previamente, Fuentes (2015) calibró FlowSim en base a la geometría de extracción que definieron los trazadores extraídos a través de la batea 30. Esta calibración presenta un buen inicio en el estudio de conciliación de datos simulados y reales, sin embargo, no toma en cuenta los datos disponibles de las 4 bateas restantes.

Debido a lo anterior, se hace necesario una nueva calibración en base al estudio de trazadores ubicados en la mina Esmeralda, esta vez tomando en consideración todos los datos existentes a la fecha, teniendo como parámetro evaluador el tonelaje de salida de cada uno de los trazadores y la forma de la zona de extracción.

El estudio de la zona de extracción según los trazadores y el resultado de la calibración, permitirán concluir sobre las características del flujo que el simulador no logra integrar, para posteriormente confeccionar metodologías conceptuales de implementación dentro de FlowSiim.

# CAPÍTULO 3

## Antecedentes de la investigación

En el presente capítulo 3 se detallan los antecedentes del lugar del estudio y la instrumentación de trazadores con los cuales se llevó a cabo la investigación. La revisión del lugar de emplazamiento de los trazadores y sus principales características, permite comprender la magnitud y complejidad del trabajo llevado a cabo. De igual forma, el conocimiento detallado del sistema de trazadores da cuenta del requerimiento tecnológico bajo el cual se sustenta la presente investigación.

### 3.1 Esmeralda

La mina Esmeralda, forma parte de la división El Teniente. El proceso de producción inicio en el año 1996, bajo la variante de panel caving con hundimiento previo para una malla tipo teniente de 15 (m) x 20 (m). Posteriormente, debido a colapsos sucedidos entre los años 2001- 2003, 2009-2010 se decide cambiar el tipo de socavación hacia hundimiento convencional. El ritmo inicial de explotación fue de 1.000 tpd, llegando en la actualidad a las 35.000 tpd.

La mina Esmeralda se divide en 6 sectores o bloques de producción, los bloques son nombrados desde el 1 al 6. El bloque sobre el cual se llevó a cabo el presente estudio es el bloque 2, a continuación, se detallan las características principales de este bloque.

#### 3.1.1 Esmeralda Bloque 2

El bloque 2 inicio su producción en julio del 2012, bajo el método de hundimiento convencional con pre-acondicionamiento hidráulico. El pre-acondicionamiento permitió disminuir el riesgo sísmico, asegurar una mejor propagación del caving y ayudar a la redistribución de esfuerzos sobre la frente de hundimiento.

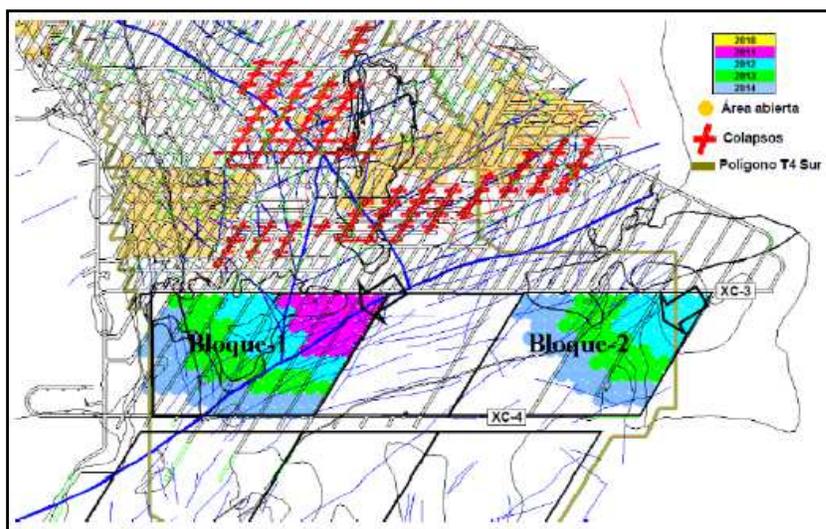


Figura3-1: Vista en planta de los bloques 1 y 2 de la mina Esmeralda.

La caracterización de este bloque se lleva a cabo cubriendo los siguientes aspectos:

### Geología y Geotecnia

El bloque 2 se encuentra ubicado entre los accesos XC3 y XC4, figura 3-1, dentro de los cuales se pueden encontrar tres tipos de unidades geológicas principales, CMET, Tonalita y Brechas. La figura 3-2 muestra la presencia de estas unidades dentro del bloque 2.

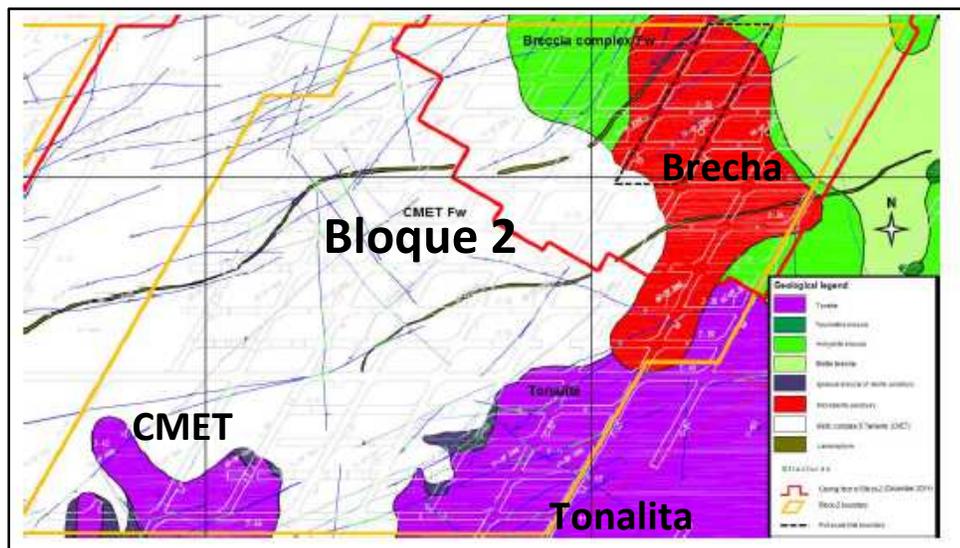


Figura 3-2: Caracterización geotécnica del bloque 2 de Esmeralda.

La falla más importante del bloque 2 es un dique con orientación NE. La calidad geotécnica según la clasificación IRMR (In Situ Rock Mass Rating), Laubscher y Jakubec (2001), de la porción CEMET es regular; mientras que la porción de brecha es clasificada como buena. La tabla 3-1 resume las principales características de las litologías presentes.

Tabla 3-1: Tabla resumen de las 3 principales litologías presentes en el bloque 2.

Unidad Geotécnica	Densidad [ton/m <sup>3</sup> ]	Porosidad [%]	Resistencia a la compresión [Mpa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson	Ángulo de fricción [°]
Brechas FW	2,75	0,75	109	10	43	0,13	42
Tonalita	2,7	0,9	171	11	52	0,12	47
CMET Fw	2,77	0,4	145	15	56	0,12	46

### Diseño minero

El bloque tiene un footprint de 240x200 m, cuenta con una malla 15x20 pasando 15x24 a partir de la zanja 33 para asegurar un mayor factor de seguridad, mayor resistencia de los pilares zanja.

El nivel de hundimiento se localiza 18 por sobre el nivel de producción (Producción en cota 2192 m). El método de hundimiento utiliza una altura de socavación de 16 m y 2 m de burdem. Las bateas son abiertas en dos etapas, y las tronaduras de socavación son hechas 3 paradas a la vez.

El bloque inició su producción a una tasa de 700 m<sup>2</sup>/mes debido a un mayor riesgo sísmico esperado por la gran altura de columna (1000 m) y contactos litológicos presentes. Ya que se reportó solo pequeña sismicidad, la velocidad se subió a 1200 m<sup>2</sup>/mes en abril del 2013.

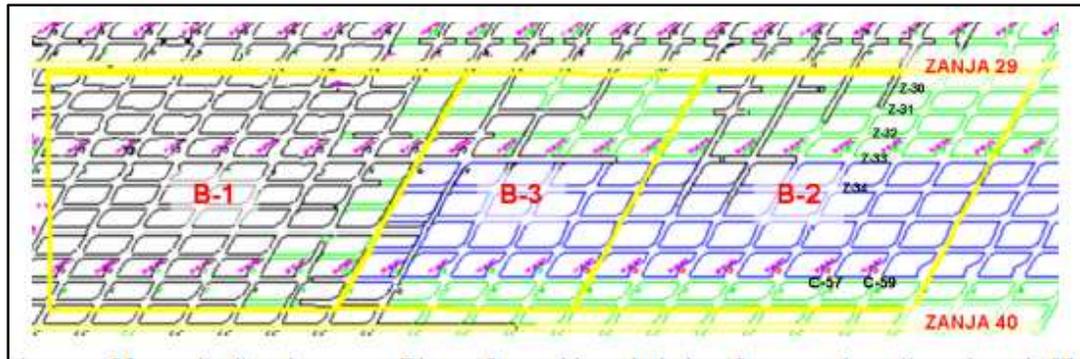


Figura 3-3: Vista en planta del bloque 2 de Esmeralda, zona de estudio.

## 3.2 Trazadores

### 3.2.1 Descripción de la tecnología de marcadores inteligentes

La metodología de trabajo de los trazadores inteligentes (Smart markers) es de directa compresión. Los trazadores se ubican dentro de la columna de mineral asociada a un punto de extracción. Debido al proceso de extracción la columna va descendiendo al igual que la altura original de posicionamiento de los trazadores, permitiendo que eventualmente los trazadores sean recuperados por el punto de extracción. Posteriormente, durante su transporte a los puntos de vaciado, los trazadores son detectados por lectores ubicados en los techos de las galerías del nivel de producción. Al tener la fecha y el punto de extracción de los trazadores, se puede determinar el tonelaje acumulado del punto a través del cual se extraen los trazadores. Este valor permitirá más tarde estudiar las zonas de flujo gravitacional del mineral, su interacción y dimensiones. La figura 3-4 describe el procedimiento de uso de los trazadores inteligentes.

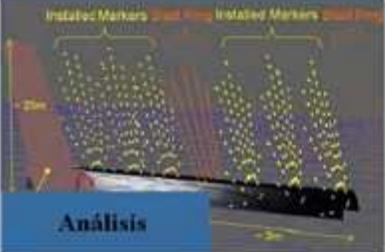
PROCEDIMIENTO	DESCRIPCIÓN
 <p><b>Instalación</b></p>	<p>Los lectores (readers) se instalan sobre las locaciones donde el equipo LHD extrae y transporte mineral.</p> <p>Posteriormente, los <i>smart markers</i> se activan e instalan en el cuerpo mineral.</p>
 <p><b>Extracción</b></p>	<p>Después de la instalación, los <i>smart markers</i> fluyen junto con el mineral hacia los puntos de extracción.</p> <p>El equipo LHD carga el mineral y algún <i>smart marker</i> dentro del balde.</p>
 <p><b>Detección</b></p>	<p>Los lectores instalados en el techo de la galería detectan automáticamente <i>smart markers</i> en el balde de LHD (permitiendo establecer la salida del marcador).</p> <p>La lectura de los datos se transfiere vía red o Bluetooth a un scanner (PC de mano para lectura de datos).</p>
 <p><b>Análisis</b></p>	<p>El análisis de flujo de roca comienza tan pronto como los <i>smart markers</i> son detectados automáticamente.</p> <p>Se utilizan herramientas gráficas para analizar los datos obtenidos.</p>

Figura 3-4: Descripción del sistema de Smart Markers.

Las principales componentes del sistema de trazadores inteligentes es el siguiente

- **Marcador inteligente (Smart Marker):** Es un dispositivo de cubierta plástica reforzada que le confiere resistencia en ambientes de sismicidad y tronadura. El dispositivo además cuenta con un identificador de radiofrecuencia que permite su rastreo a través del tiempo.
- **Sistema de sujeción (Araña):** concorde a su nombre, es una herramienta que permite la sujeción del dispositivo en el lugar especificado de ubicación.
- **Lector (Reader):** Equipo electrónico capaz de detectar la radiofrecuencia de los trazadores y establecer un registro de ellos, detecta la fecha e identifica los trazadores.
- **Activador (Activator):** Es un dispositivo utilizado para encender los trazadores antes de la instalación, permite mantener un registro de las condiciones del trazador y desactivar alguno en caso de ser necesario.

- **Scanner:** es un dispositivo portátil que actúa como interfaz para visualizar la base de datos de extracción de trazadores, también permite inspeccionar el estado de activación de los trazadores.

El proceso de estudio de trazadores inteligentes se dividió en dos, en base a la ubicación en altura de los trazadores. Es así que los trazadores se dividen en aquellos de campo cercano y campo lejano.

### 3.3. Prueba de flujo gravitacional mediante trazadores inteligentes

#### 3.3.1. Campo cercano

El campo cercano corresponde a trazadores ubicados a una altura máxima de 36 m por sobre el nivel de hundimiento. El posicionamiento de estos trazadores fue realizado entre las zanjas 30- 34 y las calles 57-59. El principal objetivo del campo cercano es el estudio de la interacción de las zonas de flujo entre bateas a través de los pilares mayor y menor.

Los trazadores de campo cercano fueron instalados mediante perforaciones radiales realizadas desde el nivel de hundimiento, sobre las calles 57 y 59. Las perforaciones se esquematizan en 10 paradas. Cada parada contiene 9 tiros, de los cuales 5 provienen de la calle 57 y 4 de la calle 59. Cada parada está compuesta de 39 trazadores ubicados dentro de los 9 tiros que la constituyen. La figura 3-5 presenta una imagen de las paradas y tiros.

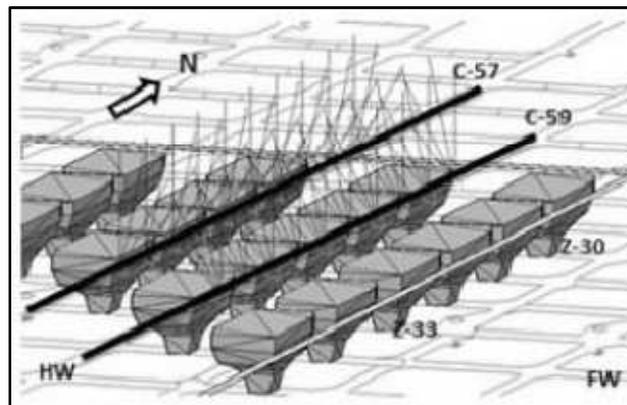


Figura 3-5: Vista en perfil del posicionamiento de trazadores de campo cercano.

#### 3.3.2. Campo lejano

Los trazadores de campo lejano son aquellos que fueron posicionados desde una altura de 30 m por sobre el nivel de hundimiento llegando cerca 100 m por sobre este nivel. Los trazadores se encuentran por sobre la calle 57 y 59 entre las zanjas 30 y 34. El principal objetivo de esta zona de estudio es conocer los movimientos laterales /verticales de las zonas esperadas a ser extraídas en el mediano/largo plazo, de esta manera aportar en el entendimiento del comportamiento de mineral a estas escalas de planificación minera.

La ubicación de estos trazadores fue realizada mediante 6 perforaciones verticales, cada una de estas considera el posicionamiento de 35 trazadores, con espaciamiento de 2 m entre marcadores,

totalizando 210 trazadores de campo lejano. La figura 3-6 muestra el posicionamiento de este tipo de trazadores.

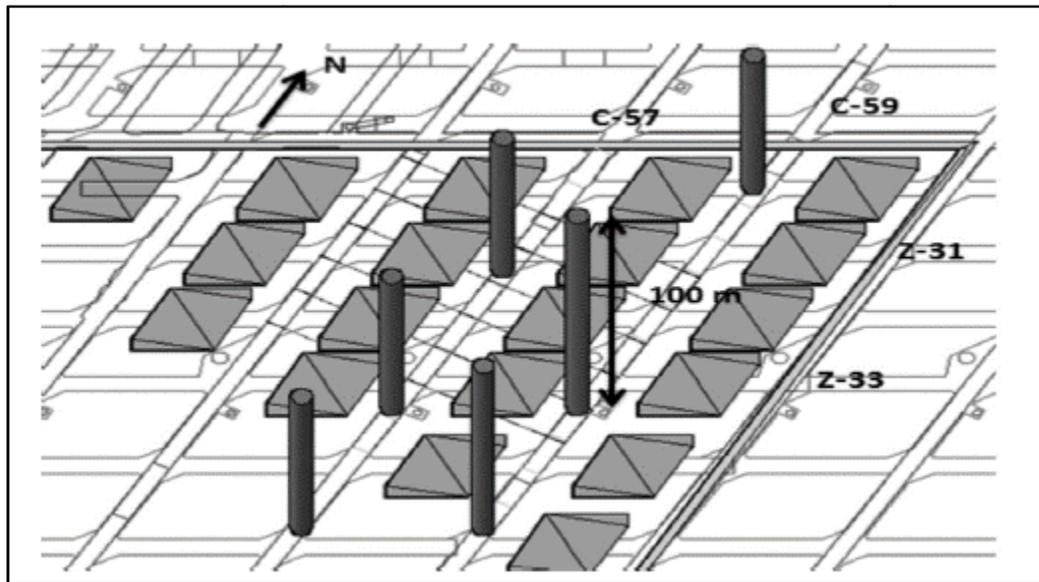


Figura 3-6: Posicionamiento de trazadores ubicados en el campo lejano.

### 3.3.3. Instalación operacional de trazadores

El procedimiento de instalación de trazadores se detalla en 5 etapas.

- I. Definir la parada de marcadores respectiva, esta debe estar entre 2 paradas consecutivas de socavación.
- II. Perforación de tiros desde el nivel de hundimiento con diámetro de 3 pulgadas para campo cercano/lejano.
- III. Introducción del trazador, con su respectiva araña, a través de la cavidad perforada. La araña como se mencionó anteriormente le confiere sujeción al trazador.
- IV. Luego del posicionamiento del primer trazador, se coloca inmediatamente después de este una barra de PVC de 5 m de largo. Esta barra se utilizó para mantener la distancia de este trazador con el siguiente. El procedimiento se repite para los demás trazadores.
- V. Para finalizar la instalación de los trazadores dentro del tiro, se colocaron conos de madera luego de la última barra. Lo anterior se hizo para evitar el desplazamiento de los trazadores y mantener la totalidad de trazadores dentro del tiro.

La figura 3-7 muestra el procedimiento operacional de instalación.

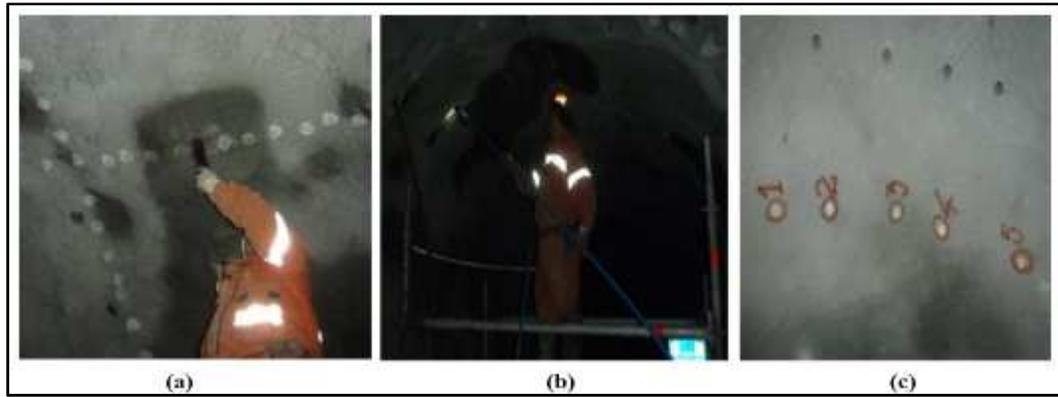


Figura 3-7: instalación operacional de trazadores. (a) Instalación de trazador. (b) Instalación de espaciador PVC. (c) Sellado de tiros.

### 3.3.4 Instalación de lectores

Con el propósito de capturar la totalidad de trazadores, es necesario emplazar los lectores en lugares estratégicos de transporte de mineral.

Para el propósito de contar con una red de detección robusta de trazadores, los lectores se posicionaron en las ubicaciones detalladas en la figura 3-8.



Figura 3-8: ubicación de lectores en el nivel de producción del bloque 2. Los números 1,2 y 3 indican el posicionamiento de los lectores.

La locación de estos lectores cerca de los puntos de traspaso, asegura que todos los equipos LHD trabajando pasen necesariamente a través de estos. La información registrada por los lectores es: fecha, hora de extracción, junto con el ID del trazador.

Es importante mencionar que adicionalmente se posicionó un lector en el nivel de transporte principal de ferrocarriles (Teniente 8).

### **3.4 Análisis de sensibilidad FlowSim**

Como se mencionó en el capítulo de estado del arte, FlowSim es una herramienta basada en autómatas celulares que permite describir la cinemática del flujo de mineral.

La realización de la simulación a través de FlowSim toma como datos de entrada las características geométricas del nivel de producción (distancia entre calles y zanjas), puntos de extracción (ancho y alto) y bateas (altura y ángulos). De igual forma, el programa internaliza las características del macizo rocoso bajo análisis (RMR, densidad, ley, litología), en la modalidad de modelo de bloques. Además de lo anterior, el programa considera la componente operacional del proceso productivo, carta de extracción.

Luego de conocer las características físicas y operacionales del modelo a simular, el próximo paso es determinar los parámetros de la función de transición y de restricción de vacíos que mejor representen el flujo de mineral.

#### **3.4.1. Análisis de los parámetros de entrada de FlowSim**

El detalle del funcionamiento de los parámetros utilizados por FlowSim permite comprender el desarrollo del flujo y establecer directrices para la posterior calibración. Para el análisis de los parámetros se simulará una batea, tiraje aislado. Se realiza sobre una sola batea ya que se desea comprender de forma independiente cada uno de los efectos que los parámetros de FlowSim causan. El detalle del análisis por parámetro se detalla continuación.

#### **Restricción de Vacíos**

Este parámetro condiciona el ascenso de vacíos, de acuerdo al cumplimiento de una cantidad determinada de estos sobre la vecindad del vacío en análisis. Este parámetro tiene directa incidencia sobre la velocidad de ascenso de los vacíos, si su valor es alto/bajo se da menor/mayor libertad de ascenso a los vacíos presentes. La condición de vacíos se puede entender también como una medida directa de la porosidad media esperada del material fragmentado, en este sentido, el parámetro cobra mayor relevancia, ya que define la densidad esperada del flujo del material fragmentado. Castro (2006) plantea que el valor promedio de  $C_v$  es igual a 3, conclusión hecha en base a estudios sobre el modelo físico del autor.

De acuerdo a lo señalado por Valencia (2014), se espera que este parámetro sea directamente proporcional al diámetro del elipsoide de movimiento

La figura 3-9 muestra la relación entre  $C_v$  y el diámetro del elipsoide de extracción.

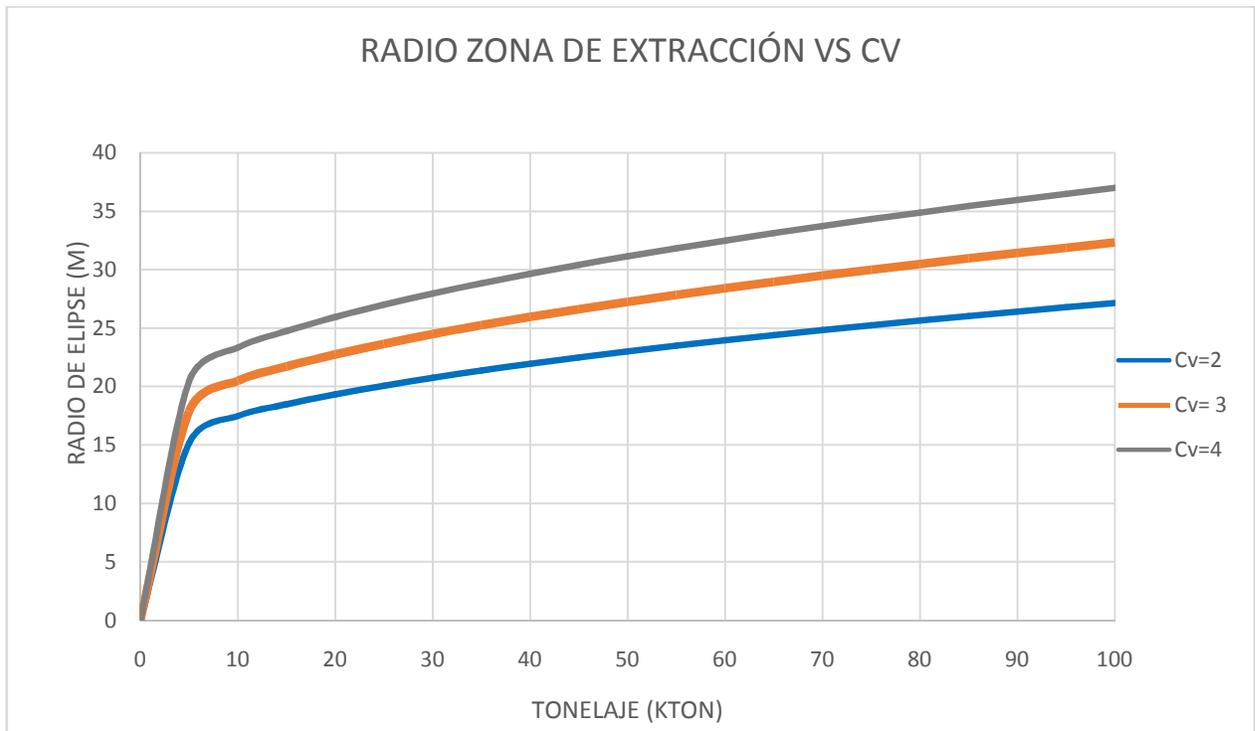


Figura 3-9: Evolución del diámetro de las zonas de extracción para distintos valores de Cv.

El grafico anterior muestra una relación directa entre el diámetro del elipsoide de extracción y el parámetro Cv, respuesta acorde a lo esperado según al análisis cualitativo del parámetro.

La restricción de vacíos es dependiente de la discretización del modelo de bloques. Es así que, para el ejemplo, si se le otorga un valor muy pequeño, 1, no se formará ninguna geometría y el flujo llegará directamente a superficie. Por otro lado, para una discretización de 2m x 2m, el valor 5 es muy grande, lo que impedirá el ascenso de vacíos.

### Parámetro N

El parámetro N es el encargado de valorar el peso de la distancia sobre la función de transición. De acuerdo a la configuración, existen 9 posiciones que el vacío en ascenso puede tomar. Dada estas posiciones, se puede distinguir tres distancias que la función de transición tomará en cuenta. Distancia del bloque inmediatamente superior al vacío, distancia de los bloques centrales y distancia de los bloques de las esquinas. La figura 3-10 describe cada una de estas distancias.

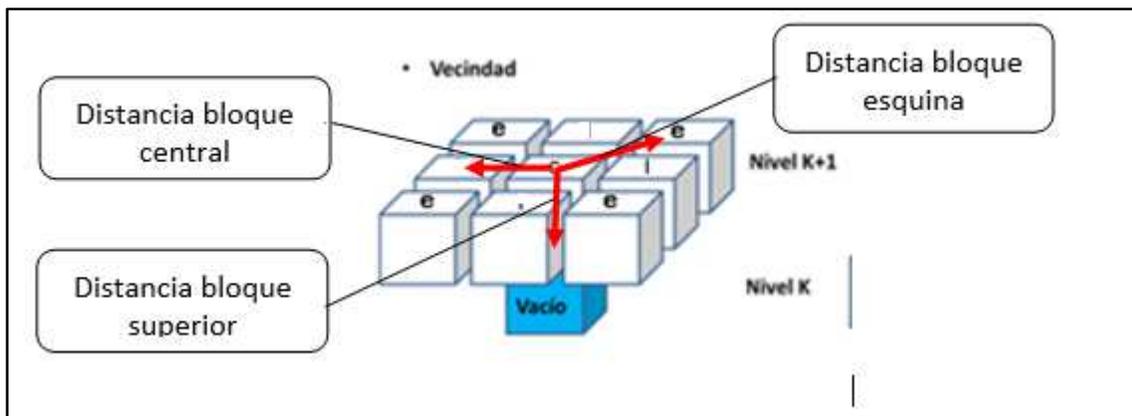


Figura 3-10: Distancias a bloques susceptibles de intercambiar lugar con el vacío ascendente.

Consecuentemente a lo mencionado en el segundo capítulo, un valor mayor/menor de este parámetro asigna una mayor/ menor probabilidad a los bloques centrales, en consecuencia, el valor de este parámetro modela directamente el diámetro del elipsoide de extracción. La figura 3-11 presenta la evolución del diámetro del elipsoide de extracción versus el parámetro N a través del proceso de extracción.

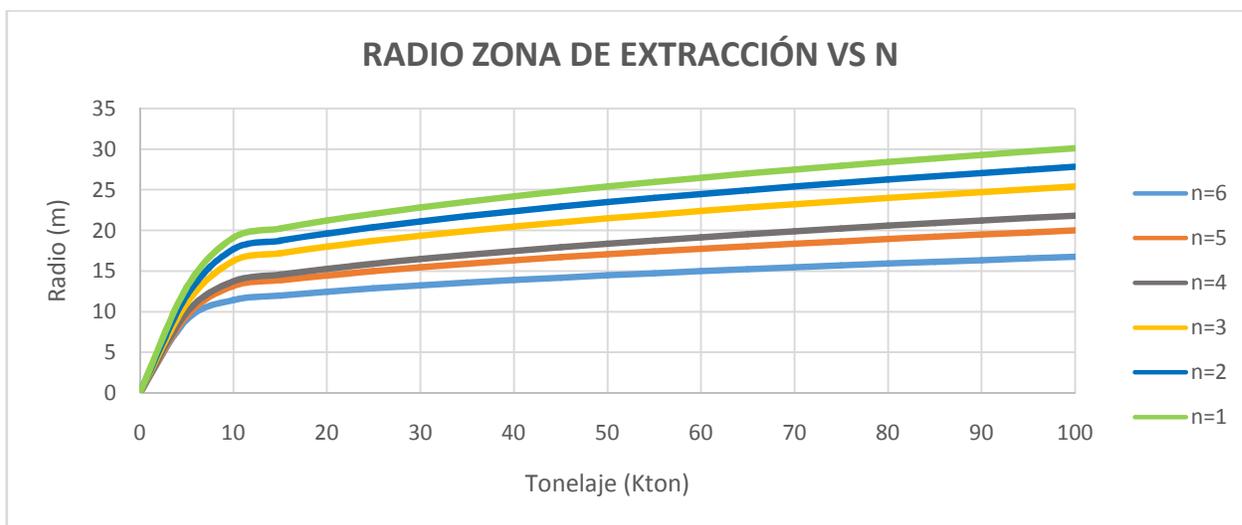


Figura 3-11: Evolución del diámetro de la zona de extracción para distintos valores de N.

El gráfico muestra una relación inversa entre el parámetro N y el diámetro del elipsoide de extracción, respuesta acorde con el análisis cualitativo de la variable y a lo enunciado por Valencia (2014). Es importante notar que el parámetro N tiene directa relación con la altura del elipsoide de movimiento, por consiguiente, define la temporalidad de la columna de mineral, si el parámetro n es mayor, se extraerá más rápido material ubicado a mayor altura, consecuentemente, se obtendrá lo inverso si su valor es menor.

### 3.5 Índice de uniformidad vectorizado (VUI)

El análisis del índice de uniformidad se hace utilizando la ecuación 4-1 propuesta por Susaeta (2004) para caracterizar el tipo de extracción. La extracción, según la matriz de uniformidad (Figura 3-12), se clasifica en tres categorías: flujo uniforme, semi-uniforme y aislado.

$$VUI = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_{p0} - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \Sigma(t_{max} - t_{pi}) \quad (4-1)$$

$\Delta$ : Número de puntos inactivos en la vecindad.

$\Gamma$ : Factor de corrección igual a  $\frac{99}{89}$ .

$t_{p0}$ : Tonelaje extraído en el periodo  $t$  por el punto en estudio.

$t_{pi}$ : Tonelaje extraído en el periodo  $t$  por el vecino  $i$ .

$t_{max}$ : Tonelaje máximo extraído en el periodo  $t$  en la vecindad.

$t_{min}$ : Tonelaje mínimo extraído en el periodo  $t$  en la vecindad.

$n$ : Número de vecinos, incluyendo el punto en estudio.

		Índice Específico de Uniformidad				
		0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1
Número de Puntos Inactivos	0	Unif	Unif	Unif	Semi	Semi
	1	Unif	Unif	Semi	Semi	Semi
	2	Unif	Semi	Semi	Semi	Des
	3	Semi	Semi	Semi	Des	Des
	4	Semi	Semi	Des	Des	Des
	5	Des	Des	Des	Des	Des
	6	Des	Des	Des	Des	Des

Figura 3-12: Matriz de uniformidad Susaeta (2004)

#### 4.2.2 Análisis granulométrico

Jaeger (1996) plantea que durante el flujo de material existe una sucesiva formación de arcos (estables e inestables), condicionando la forma del flujo. Se hace fundamental entonces el estudio de la distribución granulométrica obtenida durante la extracción de material. El análisis granulométrico se realiza en base a la evolución de la frecuencia de aparición de 5 tamaños. Para el análisis se toma en consideración los intervalos de tamaños, 0 cm - 25 cm, 25 cm - 50 cm, 50 cm - 100 cm, > 100 cm. Las distintas proporciones de cada una de estos tamaños para cada periodo, en conjunto con la extracción aplicada permitirán concluir sobre la forma en que se desarrolló el flujo de material extraído.

### 3.5 Conclusiones

El capítulo de antecedentes tuvo como objetivo dar a conocer las principales características del lugar en donde se desarrolla el estudio de trazadores, así como la metodología de

posicionamiento de estos. De igual forma en el capítulo se hace el análisis de los principales parámetros de modelamiento del programa FlowSim.

La zona en estudio comprende el espacio delimitado por las calles 59 y 57 para las bateas 30, 31, 32, 33, 34. Las dimensiones de la malla son de 15m x 20m pasando luego de la batea 33 a 15m x 22m. El dominio geológico de la zona de estudio es brecha, siendo regular en toda la extensión.

Mediante el proceso de instalación se posiciona exitosamente el 77% de los trazadores, es decir, 301 de los 390 originalmente presupuestados, razón que permite aseverar el buen grado de confiabilidad y eficiencia de la metodología.

Descrito el lugar de análisis, instrumentación de los trazadores y los principales parámetros del programa, queda entonces exponer la formulación y el desarrollo de la metodología de análisis de la investigación.

## **CAPÍTULO 4**

### **Generación y análisis de resultados**

El análisis de los datos entregados por los trazadores se realiza desde un punto de vista estadístico, teórico y visual. De acuerdo a la metodología de ubicación de los trazadores, se tiene dos conjuntos de estudio. El primero define a los trazadores cercanos al punto de extracción, hasta 30 metros por sobre el nivel de hundimiento, mientras que el segundo a aquellos denominados de campo lejano, cerca de los 100 metros por sobre el nivel de hundimiento. El intervalo de análisis para el estudio de los trazadores es desde el 01-08- 2012 al 01-01-2015.

Los trazadores posicionados en el campo cercano son 301, de los cuales se ha recuperado 138 durante el intervalo de análisis. Los trazadores posicionados en el campo lejano son 210, de los cuales se ha recuperado 17.

Ya que el posicionamiento de trazadores plantea esta diferencia de alcance, el análisis debe seguir igual metodología.

#### **4.1 Análisis zonas de extracción trazadores de campo cercano**

Los trazadores de campo cercano se ubican al interior del área de influencia que determinan las bateas 30, 31, 32, 33, 34, tal como se menciona en la sección de antecedentes. De acuerdo a las características de extracción se obtienen más trazadores en los puntos con mayor tiraje y mayor antigüedad de extracción.

La visualización del desarrollo de las zonas de extracción se realiza a través de la métrica del tonelaje. Dado que se tiene la ubicación de los trazadores y sus respectivos tonelajes de salida, se utiliza esta información para extrapolar el tonelaje de salida del área sin información entre trazadores. El programa utilizado para llevar a cabo la extrapolación es el software Matlab.

Diversos autores (Jaeger (1996); Laubscher (2000, 1994); Castro (2007); Pierce (2008); Yenge (1981)) han afirmado que la geometría de la zona de extracción depende de diversos factores operacionales y físicos (características del mineral). Tales como, granulometría esperada, uniformidad de extracción, calidad geomecánica del mineral, porosidad, condición de esfuerzos, ángulo de fricción interno y forma del mineral fragmentado.

Consecuentemente a lo planteado en el capítulo 2, al análisis del desarrollo de las geometrías de extracción se hace tomando como principales indicadores granulometría y política de tiraje. La elección de estos dos parámetros se justifica debido a su practicidad de medición en terreno y a la extensa utilización como variables de control en las minas modernas.

##### **4.1.1 Política de extracción**

El análisis de la política de extracción se realiza a escala local de zanja y a escala de vecindad. A escala local se efectúa contrastando el tiraje de los 2 puntos que componen cada bata. Se analiza a escala de vecindad en base a la uniformidad de tiraje. La uniformidad, Susaeta (2004), se evalúa

tomando como referencia un conjunto de 6 vecinos para cada uno de los puntos de extracción pertenecientes a las bateas en análisis. Es importante mencionar que el índice de uniformidad se calcula a escala diaria.

## 4.2 Análisis zanja a zanja.

### 4.2.1 Análisis zanja 30

#### Índice de Uniformidad vectorizado (VUI)

Mediante este índice se evalúa la extracción de los puntos que componen esta zanja, E5730F y E5930H, para definir si estos puntos fueron extraídos de forma uniforme, aislada o semiuniforme, con respecto a sus vecinos inmediatos. La figuras 4-1 y 4-2 presentan la evolución del VUI para ambos puntos.

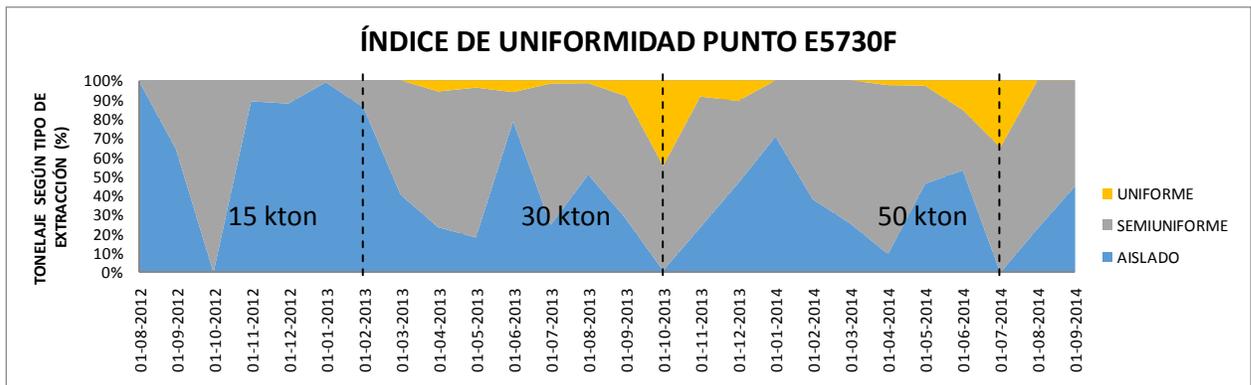


Figura 4-1: Evolución índice de uniformidad punto E5730F.

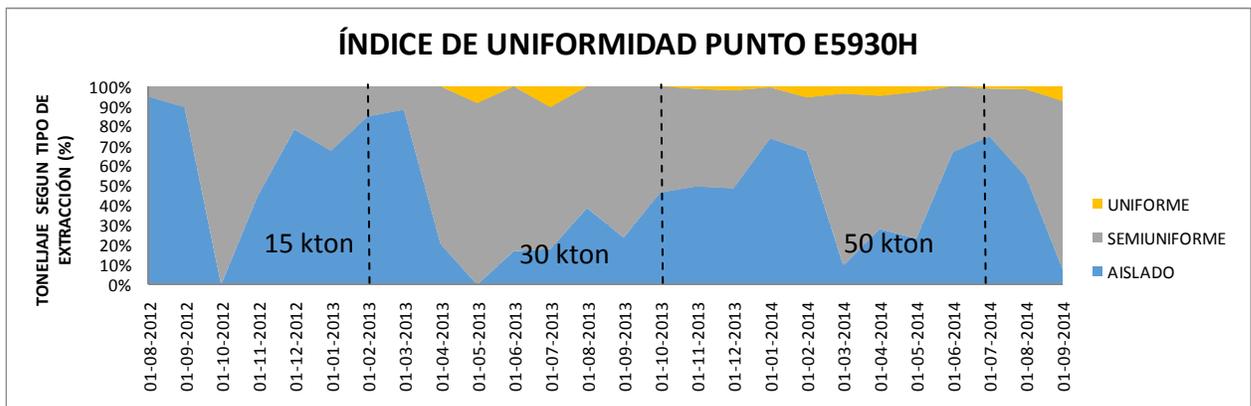


Figura 4-2: Evolución índice de uniformidad punto E5930H.

El análisis del índice de uniformidad vectorizado se calcula tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton>: El VUI de los puntos presenta similares proporciones durante el intervalo, ya que ninguno presenta extracción uniforme. Sin embargo, el punto E5930H exhibe un ligero

mayor grado de regularidad al poseer el 52% del tonelaje extraído de forma semiuniforme, mientras que el punto E5730F presenta un 40% de la misma categoría de extracción.

[15 kton – 30 kton>: El VUI tiene una evolución distinta para ambos puntos, el punto E5930H presenta un 12 % de extracción uniforme, mientras que el punto E5730F presenta un 5%.

[30 kton – 50 kton>: El índice de uniformidad vectorizado del punto E5730F presenta un 14% de extracción uniforme y el punto E5930H un 5%.

### Análisis local de extracción de los puntos que componen la zanja

La figura 4-3 presenta el tonelaje acumulado de la batea 30 y la diferencia de extracción de los puntos E5730F y E5930H, puntos que componen la zanja 30, en el eje secundario.

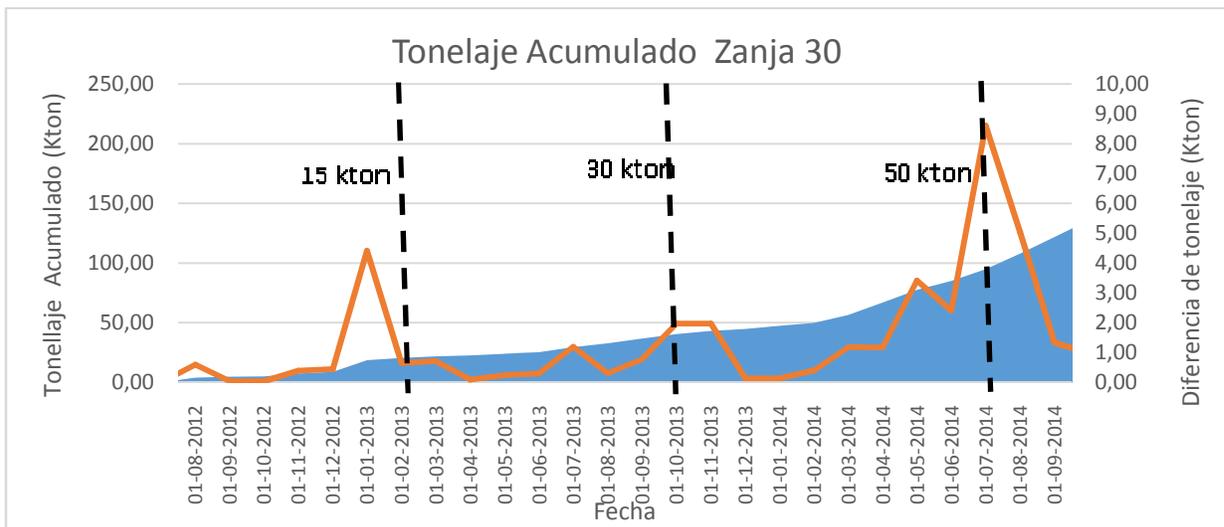


Figura 4-3: Detalle de extracción de la batea 30. Tonelaje acumulado y diferencia de tonelaje de los puntos que componen la batea.

La figura 4-3 muestra la evolución del tonelaje acumulado de la zanja 30 y la diferencia de tiraje entre los puntos que la componen, curva secundaria. Se observa que existen dos puntos en los cuales se obtiene una diferencia por sobre las 5 Kton (200% del tonelaje promedio mensual por punto, 2,5 Kton).

### Análisis granulométrico

El análisis de la granulometría se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: La granulometría del punto E5730F presenta un 15 % de mineral grueso de tamaño mayor a 100 cm, mientras se estima en 9% para el punto E5930H.

[15 kton – 30 kton >: La granulometría en este intervalo presenta una mayor cantidad de material grueso obtenido por el punto E5730F, presenta un porcentaje mayor en 5% al punto E5930H.

[30 kton – 50 kton]: La granulometría de los puntos dentro del intervalo presenta un 40% de material grueso (>50 cm) obtenido por el punto E5930H, y un 30 % obtenido por el punto E5730F.

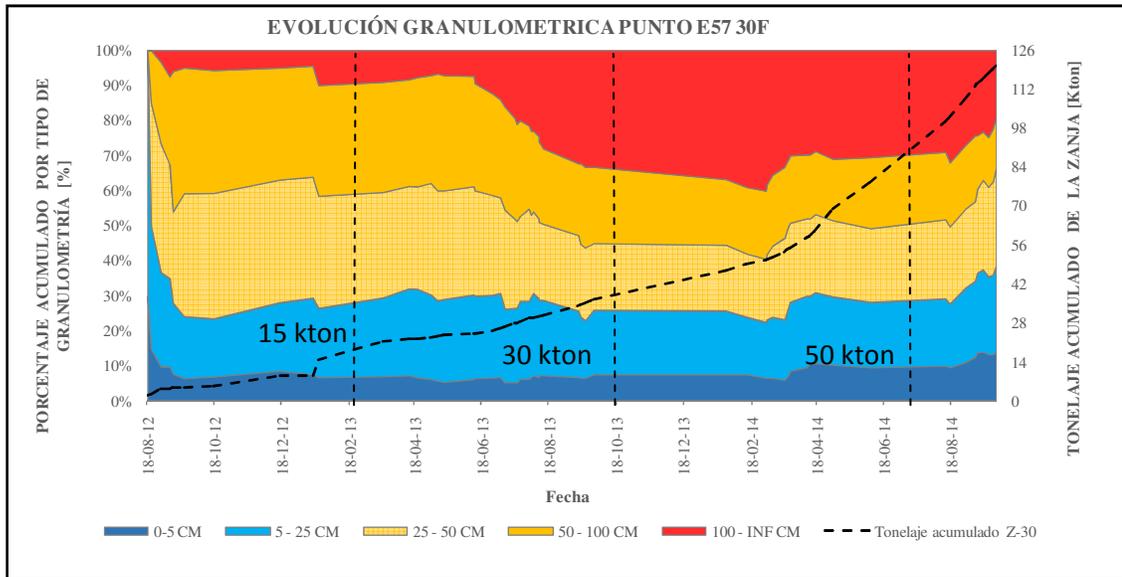


Figura 4-4: Evolución granulométrica punto E5730F.

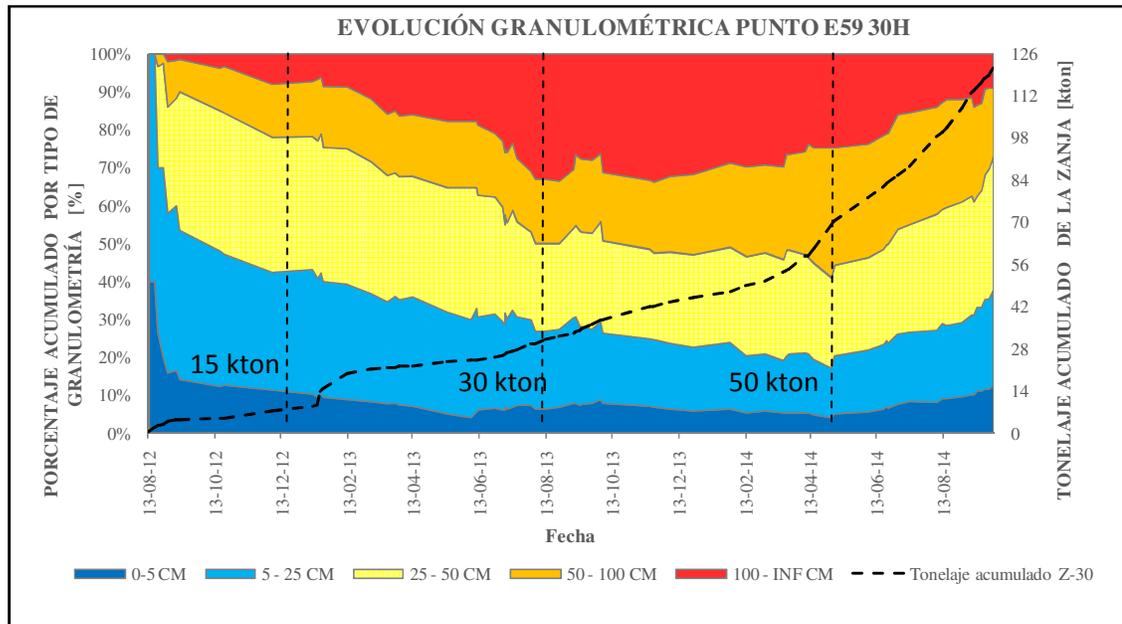


Figura 4-5: Evolución granulométrica punto E5930H.

## Zona de extracción

La figura 4-6 muestra la zona de extracción según los datos mina, extrapolación en base al software Matlab. La imagen de la izquierda es una vista longitudinal (Norte = 67.1 m) a través de la zanja, la imagen de la derecha es una vista en perfil (Este=1704 m).

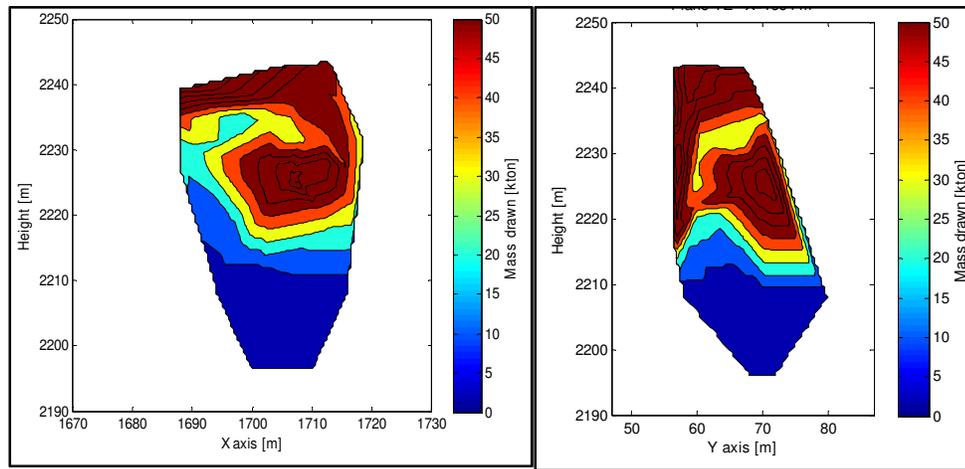


Figura 4-6: Interpolación de la zona de extracción zanja 30. Vista transversal (izquierda) y longitudinal (derecha)

Los gráficos muestran zonas preferenciales de extracción, con singularidades al centro de la columna extraída.

## Análisis desarrollo de la zona de extracción

El análisis de la zona de extracción se divide en tres periodos:

**[0 kton -15 kton]:** La Extracción parte desde el punto E5730F estabilizándose luego por un par de periodos para después experimentar un pulso de mayor extracción (4kton) por el punto E5730F. El VUI de los puntos presenta similar forma (~ 80% extracción aislada), no obstante, el punto E5930H exhibe un ligero mayor grado de regularidad al poseer mayores tonelajes de extracción semiuniforme (52%) que el punto E5730F (40%). La granulometría del punto E5730F presenta una mayor proporción de material grueso (15%), producto de la menor regularidad de tiraje y la extracción inicialmente preferente de este punto.

Debido al tiraje inicial por el punto E5730F la zona de extracción se origina por este punto. Dado que los puntos que componen la batea presentan similar uniformidad (ambos puntos exhiben extracción semiuniforme o aislada), el desarrollo de la zona de extracción para este intervalo sigue líneas concéntricas. Líneas que no son influenciadas en mayor medida por la mayor granulometría de los fragmentos que se extraen por el punto E5730F o por el pulso de mayor extracción de este mismo punto.

**[15 kton – 30 kton]:** El análisis de extracción local en este intervalo presenta un pulso de mayor extracción del punto E5730F (1 kton). El índice de uniformidad tiene una evolución distinta para ambos puntos. El punto E5930H presenta un 12 % de extracción uniforme, mientras que el punto E5730F presenta un 5%. La granulometría en este intervalo presenta una mayor cantidad de material grueso obtenido por el punto E5730F debido a su menor uniformidad de extracción.

Debido al pulso de extracción por el punto E5730F y la mayor granulometría se observa un mayor desarrollo de la zona de extracción por sobre este punto de extracción.

**[30 kton – 50 kton]:** Desde el punto de vista del análisis de extracción local, se aprecia un pulso de mayor extracción del punto E5930H (2kton). En cuanto al índice de uniformidad, el punto E5730F presenta un 14% de extracción uniforme y el punto E5930H un 5%. La granulometría del intervalo presenta una mayor proporción de material grueso obtenido por el punto E5930H (40%) en contraste al punto E5730F (30%).

Debido a la granulometría gruesa obtenida por el punto E5930H y el pulso de mayor extracción observado, el flujo de mineral trata de alcanzar un nuevo equilibrio pasando de la zona de influencia del punto E5730 hacia la zona de influencia del punto E5930H, razón que permite la formación de una singularidad al centro de la batea.

### Resumen del análisis:

El flujo muestra que cuando se establecen bajos valores de VUI se obtiene mayor proporción de material grueso.

Los pulsos de sobre tracción por alguno de los puntos genera direcciones preferenciales de extracción cuando el índice de uniformidad vectorizado presenta valores bajos.

El índice de uniformidad, pulsos de extracción y granulometría son variables que interactúan para determinar las características del flujo.

### Análisis de movimiento del mineral

La figura 4-7 muestra la gráfica del movimiento horizontal de las trazadoras minas.



Figura 4-7: Detalle desplazamiento de los trazadores extraídos de la zanja 30.

El movimiento de los trazadores se calcula como la distancia recorrida por los trazadores desde su ubicación original, hasta llegar al punto desde donde se extrajeron. Del gráfico, el desplazamiento máximo es de 22 m, lo que permite estimar el radio/diámetro de la elipse de extracción, a las 200 kton (tonelaje total de la zanja durante el periodo de análisis). Dado que el desplazamiento es por punto de extracción, el desplazamiento al centro de la batea pasa a ser 22 +/- 6 m (mitad de la distancia entre los dos puntos que componen la batea) o lo que es lo mismo, el radio de la zona de extracción de la batea pasa a ser 22 +/- 6 m.

## 4.2.2 Zanja 31

### Índice de Uniformidad (VUI)

Mediante este índice se evalúa la extracción de los puntos que componen esta zanja, E5731F y E5931H, para definir si estos puntos fueron extraídos de forma uniforme, aislada o semiuniforme, con respecto a sus vecinos más cercanos. Las figuras 4-8 y 4-9 presentan la evolución del VUI para ambos puntos.

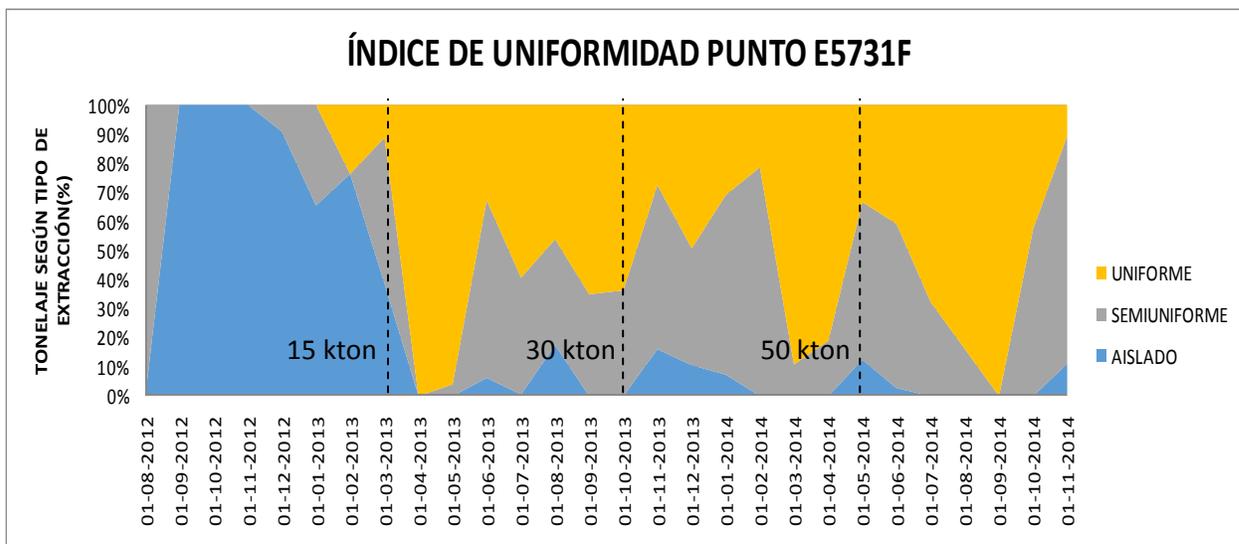


Figura 4-8: Evolución índice de uniformidad punto E5731F.

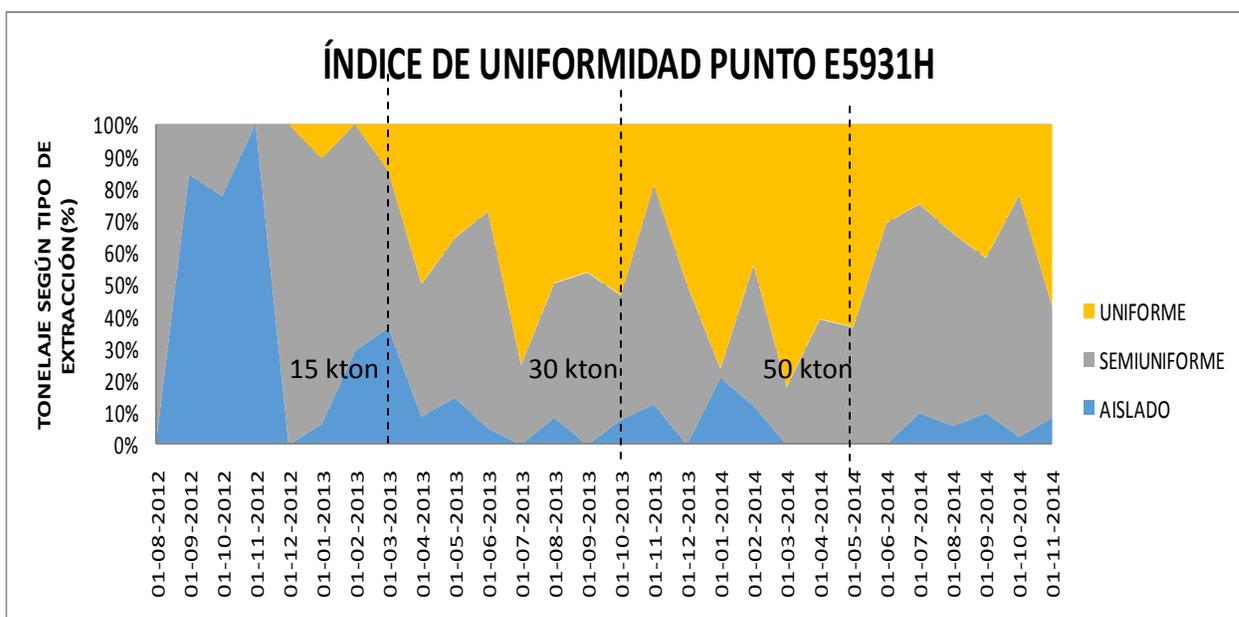


Figura 4-9: Evolución índice de uniformidad punto E5931H.

El análisis del índice de uniformidad se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: La evolución del VUI muestra que por ambos puntos se realiza extracción irregular con predominante proporción de tiraje aislado y semiuniforme (~ 90%).

[15 kton – 30 kton >: El VUI muestra un 61% de extracción uniforme por el punto E5731F, mientras que se estima en 40% para el punto E5931H.

[30 kton – 50 kton]: El VUI de ambos puntos presenta un desarrollo similar, 50% de extracción uniforme en promedio para ambos puntos.

### Análisis local de extracción de los puntos que componen la zanja

La figura 4-10 presenta el tonelaje acumulado de la batea 31 y la diferencia de extracción de los puntos E5731F y E5931H, puntos que componen la zanja 31, en el eje secundario.

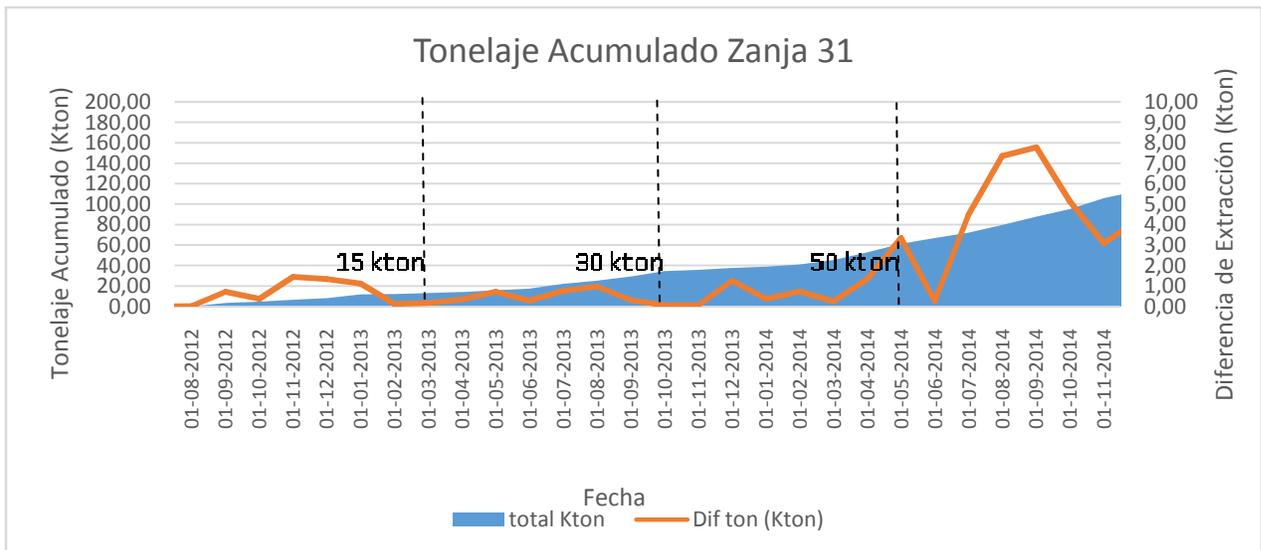


Figura 4-10: Detalle de extracción de la batea 31. Tonelaje acumulado y diferencia de tonelaje de los puntos que componen la batea.

La diferencia en tonelaje de los puntos que componen la batea 31 es más constante, no obstante, se observa en el último intervalo de análisis 2 periodos con sobre-extracción a través del punto E5931H.

### Análisis granulométrico

El análisis de la granulometría se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton]

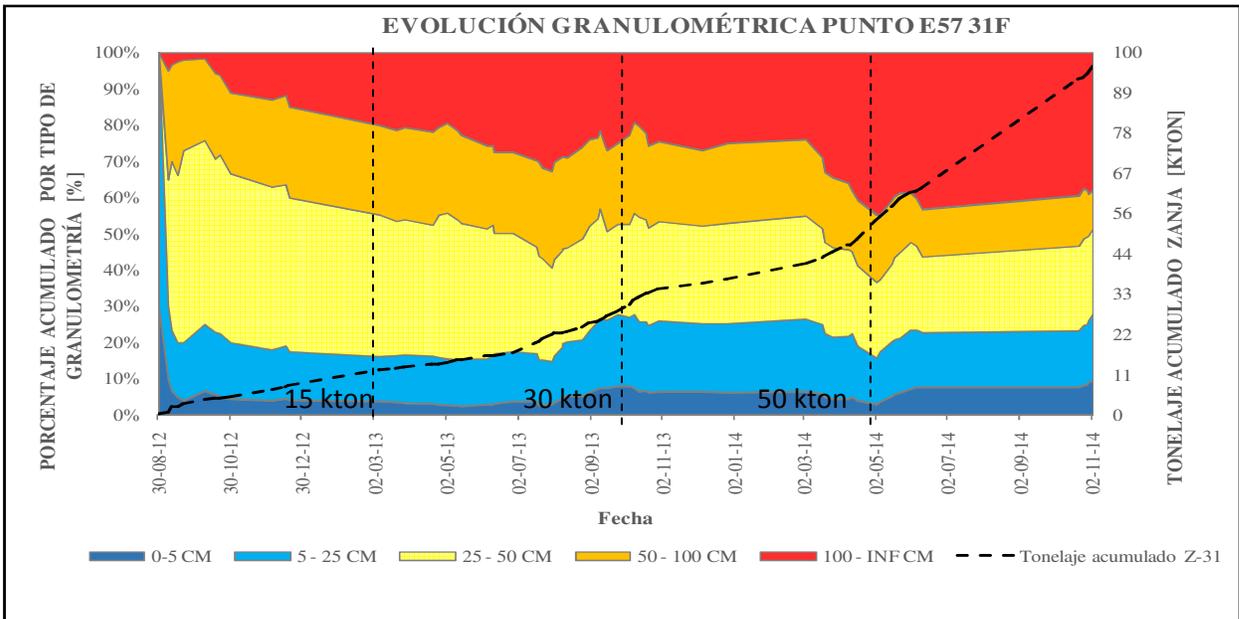


Figura 4-11: Evolución granulométrica punto E5731F.

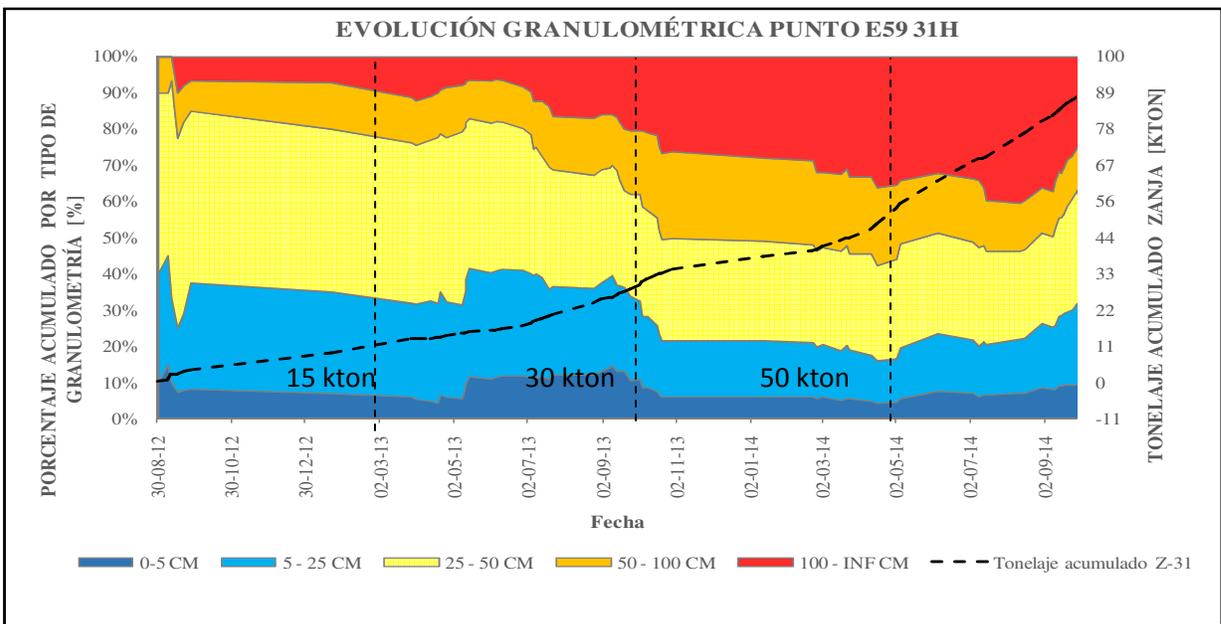


Figura 4-12: Evolución granulométrica punto E5931H.

[0 kton – 15 kton >: La granulometría de ambos puntos muestra valores similares durante el intervalo.

[15 kton – 30 kton >: La granulometría observada del punto E5731F presenta un 18% de extracción de material grueso (> 100 cm), mientras que la granulometría del punto E5931H presenta un 8%.

[30 kton – 50 kton]: El desarrollo de la granulometría presenta una forma similar para ambos puntos.

### Zona de extracción

En la figura 4-13 se muestra la zona de extracción según los datos mina. La primera imagen es una vista longitudinal a través de la zanja (Norte = 49.9 m), la segunda una vista en perfil (Este= 1697 m).

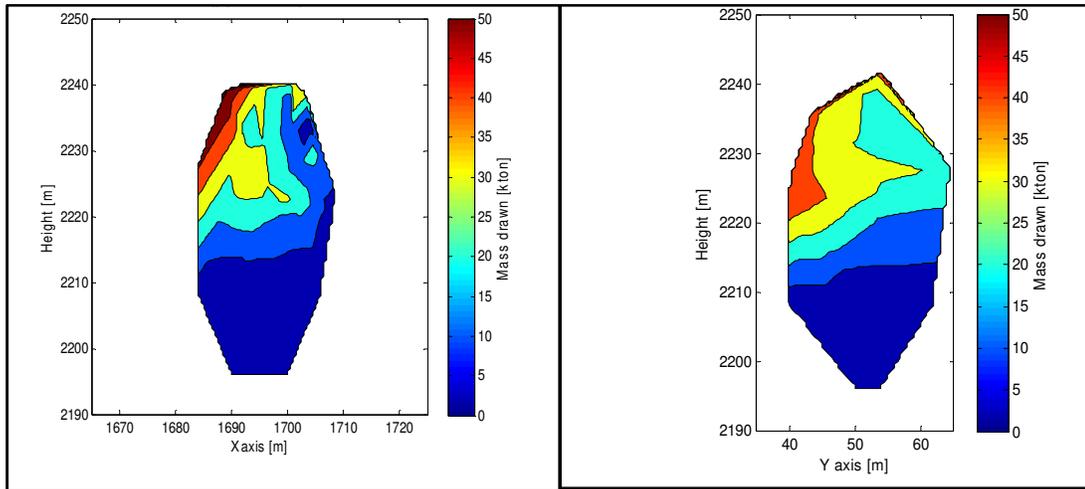


Figura 4-13: Interpolación de la zona de extracción zanja 31. Vista transversal (izquierda) y longitudinal (derecha)

### Análisis desarrollo de la zona de extracción.

**[0 kton – 15 kton]:** El análisis de extracción local para este periodo muestra que el inicio de producción de la batea es por el punto E5731F, lo que origina una mayor extracción acumulada del mismo punto. La evolución del índice de uniformidad muestra que ambos puntos presentan extracciones irregulares con predominante proporción de tiraje aislado (60 %). La granulometría de ambos puntos muestra gran proporción (~51 %) de material con tamaño 25 cm – 50 cm, además de 15%, en promedio, de material con tamaño >100 cm.

Debido a la extracción inicial del punto E5731F se espera que la zona de extracción se desarrolle inicialmente desde la parte superior del punto E5731F, pronostico que sucede, sin embargo, luego de un lapso el flujo se direcciona por el lado opuesto. Una explicación a este hallazgo puede ser la formación de una colgadura por sobre este punto. Se sabe que cuando se obstruye parte de la columna de mineral, los fragmentos de menor tamaño son los que adquieren mayor probabilidad de descender debido al menor espacio que necesitan para trasladarse. La aseveración anterior se ve validada al observar la granulometría obtenida durante este intervalo para ambos puntos (50% de tamaño entre 25 cm – 50cm). De esta forma la zona de extracción se desarrolla preferencialmente por sobre el punto E5930H.

**[15 kton -30 kton]:** El análisis de extracción local evidencia una extracción similar sin desviaciones significativas de tonelaje entre los puntos. El VUI muestra una mayor uniformidad del punto E5731F (61%). La granulometría observada en la zanja presenta una significativa mayor cantidad de material grueso por el punto E5731F (18%), efecto que no tiene relación con

la mayor uniformidad del punto; pero que si adquiere sustento al establecer que el material grueso obtenido en este intervalo, es el que anteriormente dio origen a una colgadura.

Debido a la concentración de material grueso por sobre el punto E5731F producto de una colgadura en el intervalo anterior y la posterior remoción de esta, el flujo de material se direcciona por sobre el punto E5731F.

[30 kton – 50 kton>: El análisis de extracción local muestra un pulso de mayor extracción del punto E5931H (7 kton). El VUI de ambos puntos presenta un desarrollo similar (~50% de extracción uniforme). El desarrollo de la granulometría presenta una forma similar para ambos puntos.

El flujo de mineral sigue su desarrollo a favor de la zona por sobre el punto E5731F, y no se ve afectado por el pulso de mayor extracción del punto E5930H. La razón se debe a la buena similitud en cuanto a la evolución del VUI para ambos puntos.

### Resumen del análisis:

El flujo muestra que cuando se establecen igual valores de uniformidad (VUI), la extracción se establece como el principal mecanismo del flujo.

Los pulso de sobre extracción por el punto E5931H durante el último intervalo de análisis no tiene efecto sobre la dirección del flujo ya que la uniformidad se presenta como el mecanismo principal

El índice de uniformidad, pulsos de extracción y granulometría son variables que interactúan para determinar las características del flujo.

La figura 4-14 muestra el movimiento horizontal de los datos mina



Figura 4-14: Detalle desplazamiento de los trazadores extraídos de la zanja 31.

El análisis del desplazamiento de los trazadores de la zanja 31 muestra un máximo de 22 metros. El desplazamiento promedio permite estimar el radio de la zona de extracción, a las 180 kton, tonelaje extraído durante el periodo. Dado que este desplazamiento es calculado respecto del punto de extracción de salida del trazador, el desplazamiento al punto medio de la batea o lo que es lo mismo el radio del elipsoide asociado a la batea se estima en 22+/- 6 m.

### 4.2.3 Zanja 32

#### Índice de Uniformidad (VUI)

Mediante este índice se evalúa la extracción de los puntos que componen esta zanja, E5732F y E5932H, para definir si estos puntos fueron extraídos de forma uniforme, aislada o semiuniforme, con respecto a sus vecinos geométricos cercanos. Las figuras 4-15 y 4-16 presentan la evolución del VUI para ambos puntos.

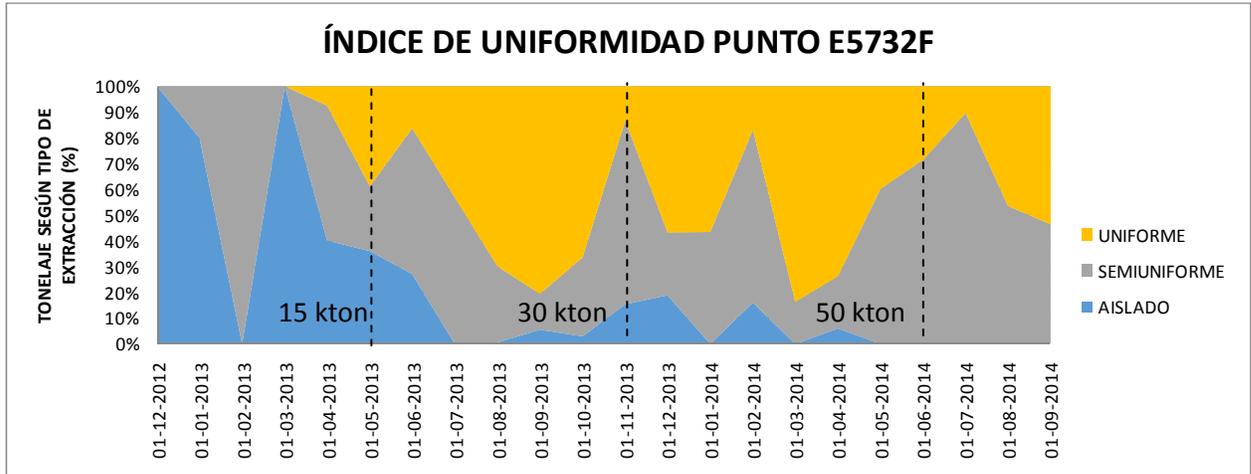


Figura 4-15: Evolución índice de uniformidad punto E5732F.

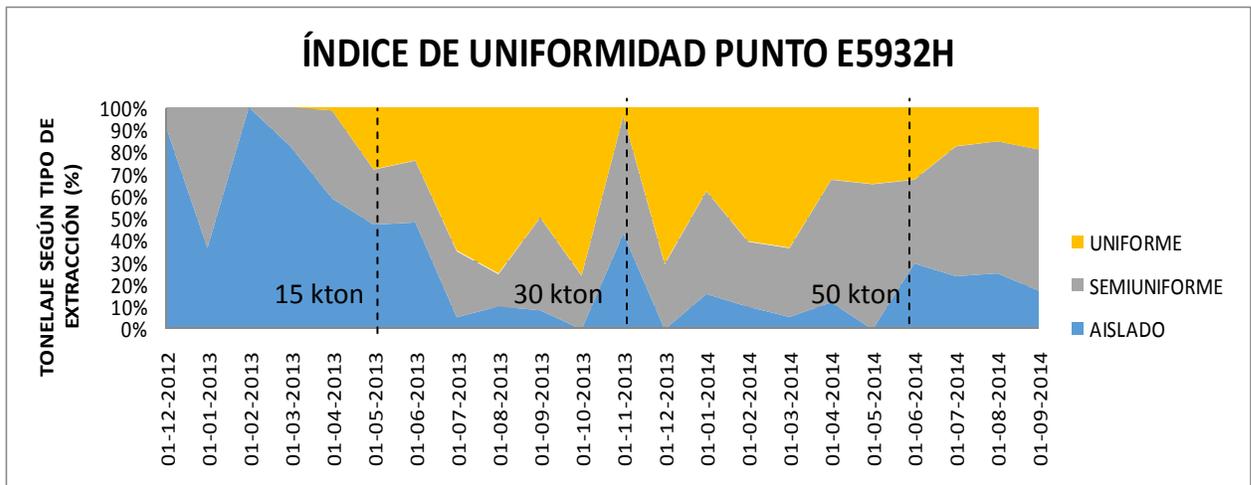


Figura 4-16: Evolución índice de uniformidad punto E5932H.

El análisis del índice de uniformidad se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: Durante este periodo se observa que los puntos que componen la batea presentan una pequeña fracción de extracción uniforme (~ 5 %). Sin embargo, se aprecia que el

punto E5732F presenta una mayor proporción de semiuniformidad (30 %) en comparación al punto E5932H (18 %).

[15 kton – 30 kton >: El VUI de los puntos muestra que existe mayor uniformidad de extracción a través del punto E5932H (45 % de extracción uniforme) en comparación al punto E5732F (43% de extracción uniforme).

[30 kton – 50 kton]: El análisis de VUI indica que a través del intervalo el punto E5732F se experimenta mayor proporción de extracción uniforme (45%), en comparación al punto E5932H (35%).

### Análisis local de extracción de los puntos que componen la zanja

Los puntos E5732F y E5932H componen esta batea. El detalle del tonelaje acumulado de la batea y la diferencia de tonelaje se muestran en la figura 4-17. Se observa que al final del tercer intervalo de análisis existe un periodo con sobre-extracción a través del punto E5932H (5kton).

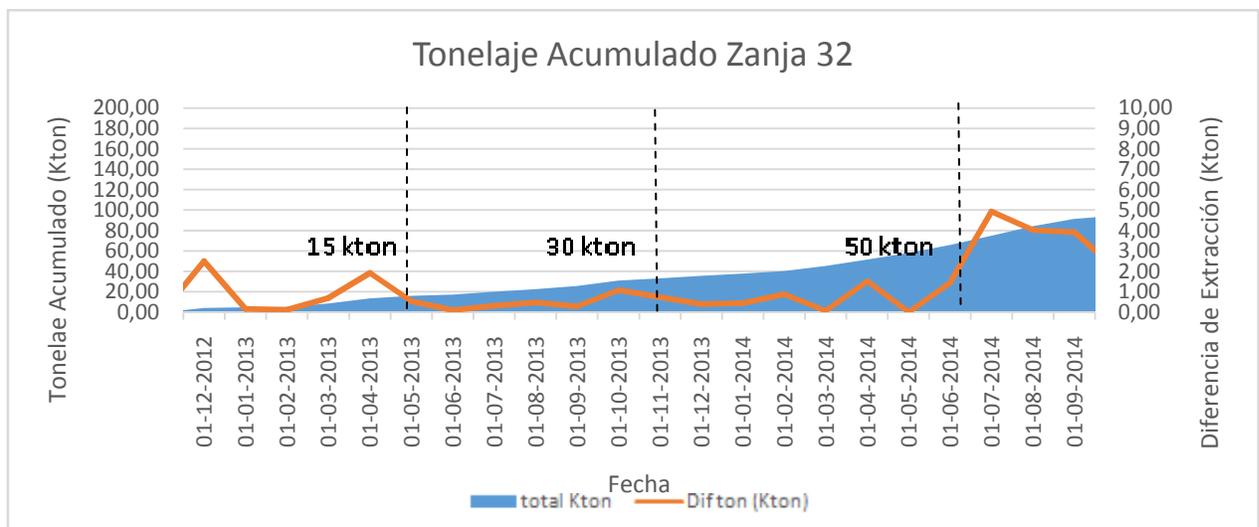


Figura 4-17: Detalle de extracción de la batea 32. Tonelaje acumulado y diferencia de tonelaje de los puntos que componen la batea.

## Análisis granulométrico

El análisis de la granulometría se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton]

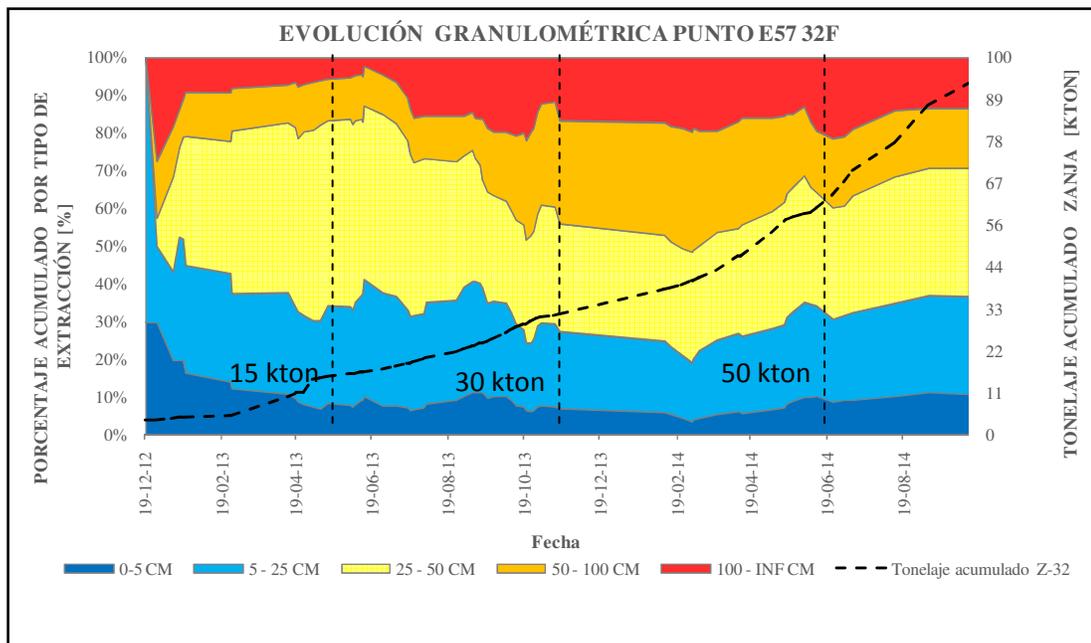


Figura 4-18: Evolución granulométrica punto E5732F.

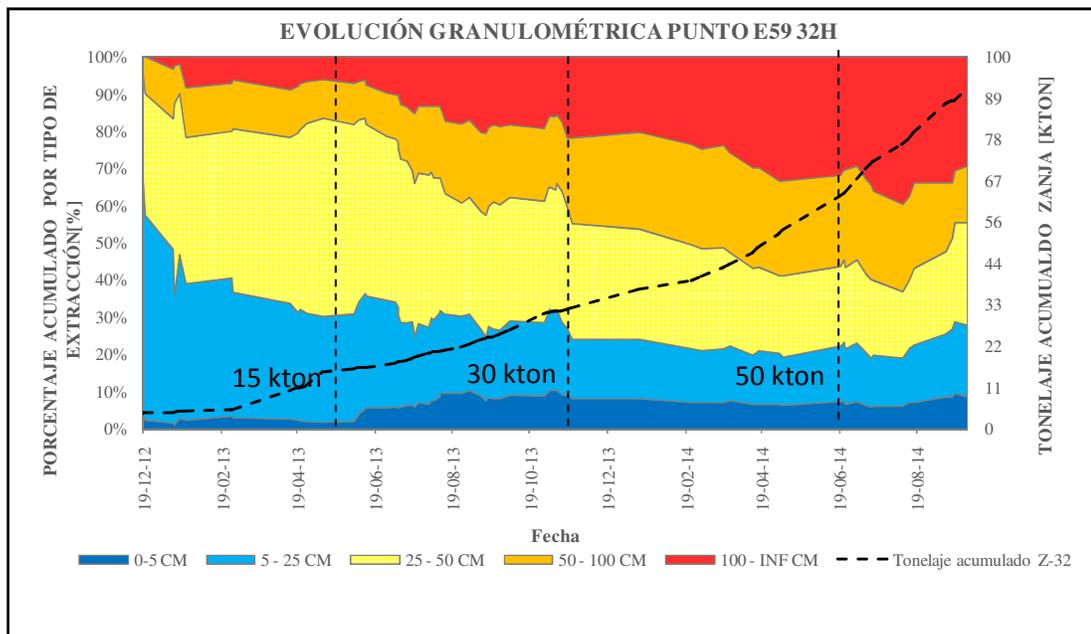


Figura 4-19: Evolución granulométrica punto E5932H.

**[0 kton – 15 kton >:** La diferencia más significativa durante este intervalo es la obtención de material de menor tamaño [5 cm – 25 cm], se estima para el punto E5932H es de 30%, mientras que para el punto E5732F es de un 15%.

[15 kton – 30 kton >: La evolución granulométrica de los puntos no evidencia mayor diferencia entre los puntos que componen la batea.

[30 kton – 50 kton]: Durante este intervalo se observa que a través del punto E5932H se obtiene 28 % de material grueso (> 100 cm), mientras que por el punto E5732F se obtiene un 15 %.

#### 4.3.3.4 Zona de extracción

La figura 4-20 muestra la zona de extracción según los datos mina. La primera imagen es una vista longitudinal a través de la zanja (Norte = 33.5 m), la segunda una vista en perfil (Este= 1687 m).

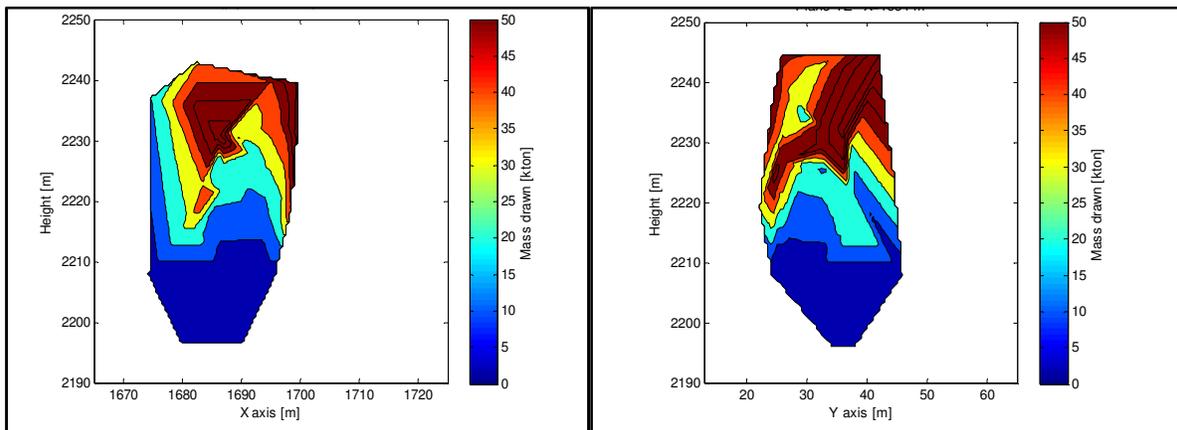


Figura 4-20: Interpolación de la zona de extracción zanja 32. Vista transversal (izquierda) y longitudinal (derecha)

#### Análisis desarrollo de la zona de extracción

[0 kton -15 kton>: El contraste de la extracción local de los puntos que componen la batea muestra que la apertura de producción se inicia por el punto E5732F, motivo que ocasiona una diferencia de extracción acumulada por este punto durante el intervalo. Durante este periodo se observa que el punto E5732F presenta un mayor grado de uniformidad de extracción (30% de semiuniformidad). En términos de evolución granulométrica, se advierte que la granulometría del punto E5932H presenta ligeramente mayor cantidad de finos (30%), efecto que se puede entender por menor uniformidad de este punto de extracción.

La zona de extracción se inicia por el punto E5732F y se desarrolla de forma irregular producto de gran proporción de extracción aislada, 70%, de los puntos que componen la batea.

[15 kton – 30 kton>: El contraste de la extracción de los puntos que componen la batea no muestra significativa diferencia a lo largo del intervalo. El VUI de los puntos muestra que existe similar uniformidad de extracción a través de los puntos que componen la batea (~44%). La granulometría en este intervalo no presenta mayor diferencia.

El desarrollo de la zona de extracción muestra un desarrollo regular que evoluciona estratificadamente en la dirección vertical producto de la similar uniformidad y la no existencia de pulsos de extracción irregular de alguno de los puntos que componen la batea.

**[30 kton – 50 kton]:** La carta de extracción de los puntos que componen la batea muestra que existe un pulso de mayor extracción en la última parte del periodo, mayor extracción (7kton) por el punto E5932H. El análisis de VUI indica que el punto E5732F experimenta mayor uniformidad de extracción durante el intervalo (45%). La granulometría del punto E5932H presenta mayor proporción de material grueso producto de la menor uniformidad de este punto.

Debido al pulso de extracción del punto E5932H (7kton) y la mayor uniformidad del punto E5732F, el flujo de mineral se direcciona hacia el final del intervalo por sobre el punto E5932H.

Se puede resumir del análisis:

Al igual que en el caso de la zanja 31, se muestra que cuando se establecen igual valores de uniformidad (VUI), la extracción se establece como el principal mecanismo del flujo.

El pulso de sobre extracción por el punto E5932H durante el último intervalo de análisis tiene un efecto determinante sobre la dirección del flujo. Dado que existe una diferencia de 10% entre el grado de uniformidad de ambos puntos en el último periodo, el pulso de sobre extracción que sucede a través del punto E5932H causa que el flujo se desarrolle por encima de este punto.

El índice de uniformidad, pulsos de extracción y granulometría son variables que interactúan para determinar las características del flujo.

La figura 4-21 muestra el movimiento horizontal de los datos mina.



Figura 4-21: Detalle desplazamiento de los trazadores extraídos de la zanja 32.

El análisis del desplazamiento de los trazadores de la zanja 32 muestra un máximo de 18 metros.

El desplazamiento promedio permite estimar el radio de la zona de extracción, a las 170 kton (tonelaje total extraído por la batea durante el periodo de análisis). Dado que este desplazamiento es calculado respecto del punto de extracción de salida del trazador, el desplazamiento al punto medio de la batea o lo que es lo mismo el radio del elipsoide asociado a la batea se estima en 18+/- 6 m.

## 4.2.4 Zanja 33

### Índice de Uniformidad (VUI)

Mediante este índice se evalúa la extracción de los puntos que componen esta zanja, E5733F y E5933H, para definir si estos puntos fueron extraídos de forma uniforme, aislada o semiuniforme, con respecto a sus vecinos cercanos. Las figuras 4-22 y 4-23 presentan la evolución del VUI para ambos puntos.

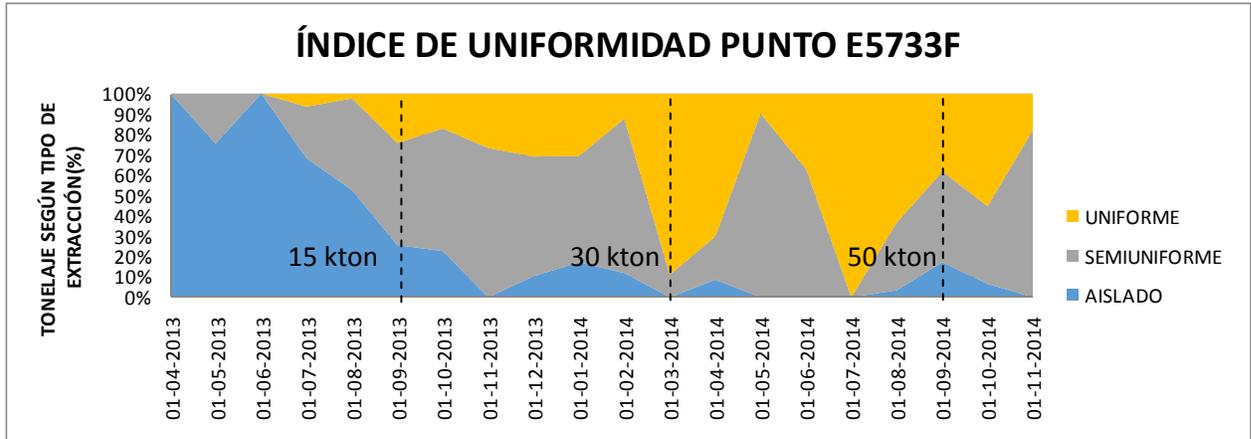


Figura 4-22: Evolución índice de uniformidad punto E5733F.

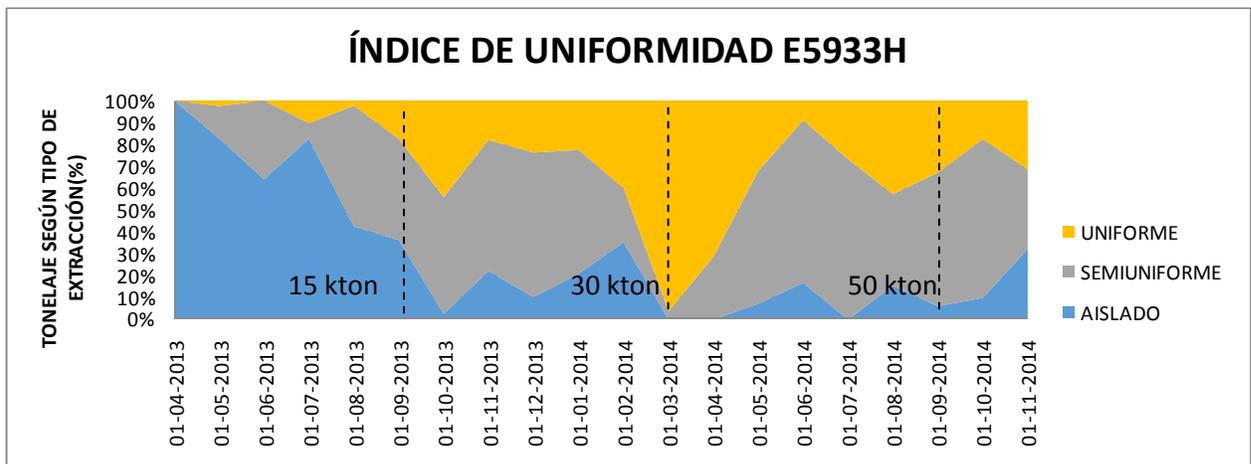


Figura 4-23: Evolución índice de uniformidad punto E5933H.

El análisis del índice de uniformidad se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: El análisis del VUI presenta una evolución similar de los puntos de extracción durante el intervalo, 4% de extracción uniforme a través del punto E5733F y 5% de extracción uniforme por el punto E5934H. Los dos puntos exhiben gran proporción de tiraje aislado (~80%).

[15 kton – 30 kton >: El VUI exhibe valores parecidos para ambos puntos, 20% de extracción uniforme para el punto E5733F y 23% de extracción uniforme para el punto E5933H. Los 2 puntos presentan gran parte del periodo con extracción semiuniforme y aislada (~80%).

[30 kton – 50 kton]: La evolución del VUI indica que el punto E5733F presenta un mayor grado de extracción uniforme (43%) que el obtenido por el punto E5933H (32 %).

### Análisis local de extracción de los puntos que componen la zanja

Los puntos E5733F y E5933H componen esta batea. El detalle del tonelaje acumulado de la batea y la diferencia de tonelaje se muestran en la figura 4-24. No se observan desviaciones producto de algún evento de sobre- extracción por los puntos que componen la zanja.

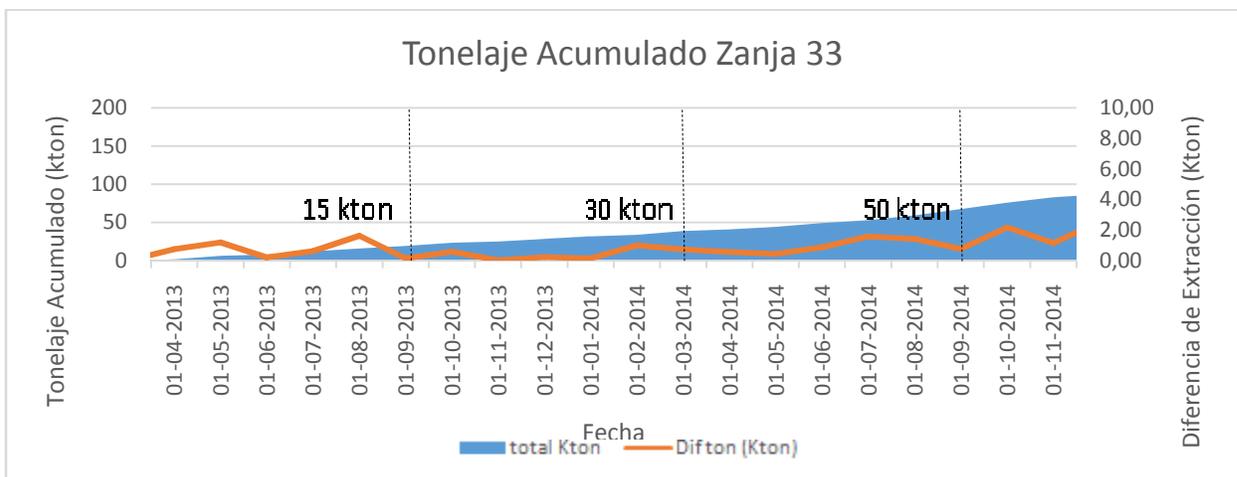


Figura 4-24: Detalle de extracción de la batea 33. Tonelaje acumulado y diferencia de tonelaje de los puntos que componen la batea.

## Análisis granulométrico

El análisis de la granulometría se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton]

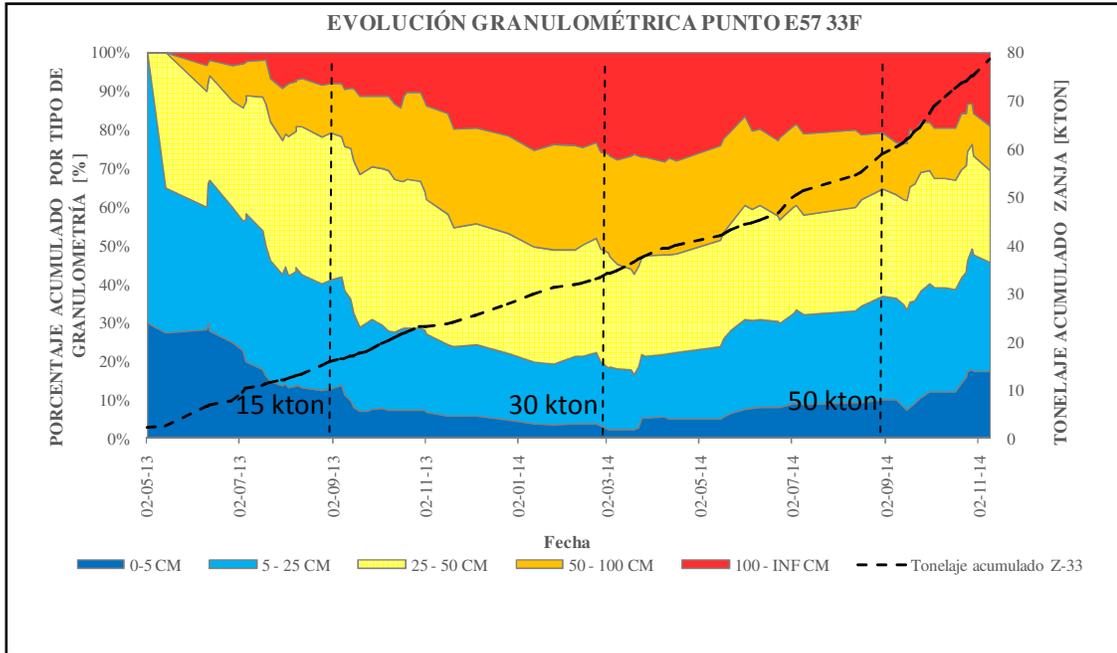


Figura 4-25: Evolución granulométrica punto E5733F.

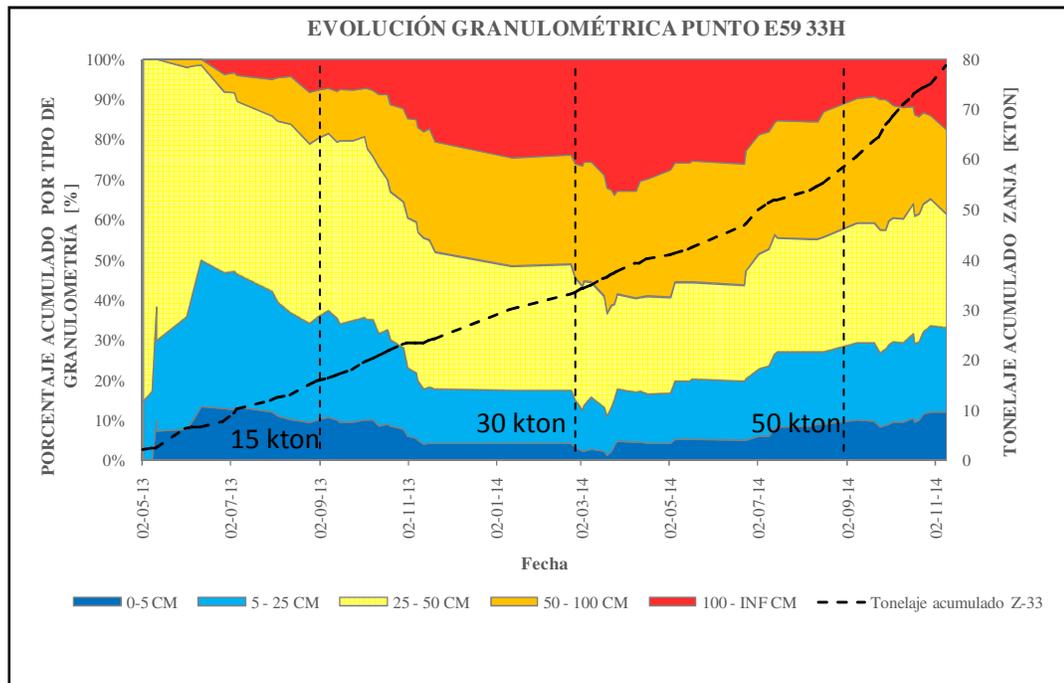


Figura 4-26: Evolución granulométrica punto E5933H.

[0 kton – 15 kton >: La evolución granulométrica de los puntos muestra que existe igual proporción, 3%, de material mayor a 100 cm extraído por ambos puntos.

[15 kton – 30 kton >: La evolución granulometría de los puntos es similar, 20% de material mayor a 100 cm extraído a través del punto E5733F y 25% de material de ese mismo tamaño extraído por el punto E5933H.

[30 kton – 50 kton]: Se observa que el punto E5933H presenta un 30 % de material grueso entre 50cm a 100 cm, mientras que el punto E5733F muestra un 20 % de este tipo de material.

## Zona de extracción

La figura 4-27 muestra la zona de extracción según los datos mina. La primera imagen es una vista longitudinal a través de la zanja (Norte = 17.7 m), la segunda una vista en perfil (Este= 1678 m).

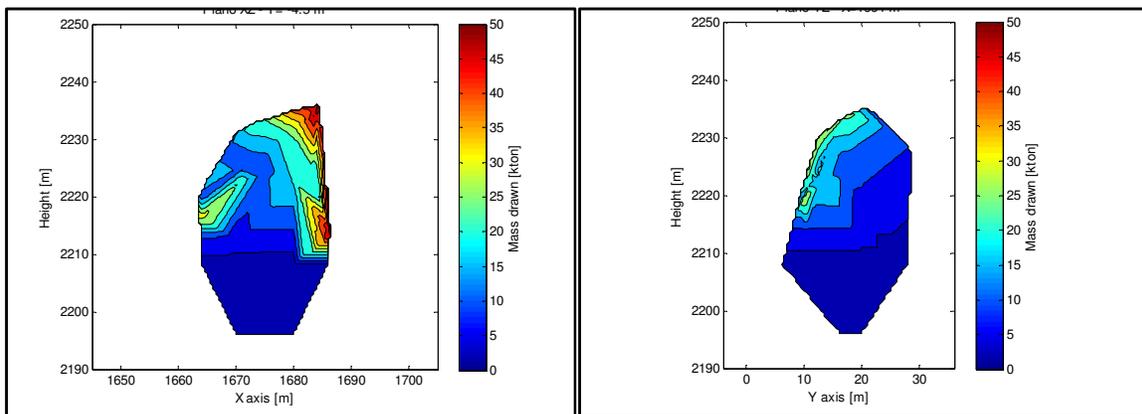


Figura 4-27: interpolación de la zona de extracción zanja 33. Vista transversal (izquierda) y longitudinal (derecha)

## Análisis desarrollo de la zona de extracción

[0 kton -15 kton>: La comparación de los puntos que componen la batea muestra que la extracción de la batea se inicia de forma simultánea en ambos puntos de extracción. El análisis del VUI presenta una evolución similar de los puntos de extracción durante el intervalo, los dos puntos exhiben gran proporción de tiraje aislado. La evolución granulométrica de los puntos muestra que existe igual proporción de material grueso extraído por los puntos E5733F y E5933H efecto que puede asociarse a la extracción aislada de los puntos que permite la entrada de material grueso de las bateas adyacentes.

El desarrollo de la zona de extracción en este intervalo sigue un desarrollo irregular producto de la baja uniformidad de los puntos que componen la batea.

[15 kton -30 kton>: El contraste de la extracción de los puntos que componen la batea muestra que esta se desarrolla de forma similar para ambos puntos. El VUI muestra que ambos puntos presentan gran parte del periodo con extracción semiuniforme y aislada (~ 80%). La evolución granulometría de los puntos es similar, siendo la proporción predominante aquella de 25 cm – 50 cm.

El desarrollo de la zona de extracción durante el intervalo de análisis es irregular. La evolución irregular se puede comprender al tener en cuenta la gran proporción de flujo semiuniforme y aislado observado en los dos puntos de la batea.

**[30 kton -50 kton>:** Al igual que en los intervalos anteriores no se aprecia mayor diferencia en tiraje de los puntos E5733F y E5933H. La evolución del VUI indica que el punto E5733F presenta un mayor grado de uniformidad durante el intervalo (43%). En cuanto a la granulometría obtenida, se observa que el punto E5933H presenta una mayor proporción de material grueso entre 50cm a 100 cm (30%) producto de la menor uniformidad del punto.

El desarrollo de la zona de extracción en este intervalo se direcciona hacia el punto E5933H de la batea. La razón de la forma del flujo puede justificarse debido a la menor uniformidad del punto E5933H y a la mayor cantidad de material grueso que se extrae por este punto.

### Resumen del análisis:

Se muestra que el índice de uniformidad, (VUI), se establece como el principal mecanismo del flujo.

Del segundo intervalo de análisis se aprecia que aun cuando haya una diferencia granulométrica de material grueso ( $> 100$  cm), esta no incide en la dirección del flujo si el índice de uniformidad muestra bajos valores de uniformidad (20% y 23% para los puntos E5733F y E5933H respectivamente).

El índice de uniformidad, pulsos de extracción y granulometría son variables que interactúan para determinar las características del flujo.

La figura 4-28 muestra el movimiento horizontal de los datos mina.



Figura 4-28: Detalle desplazamiento de los trazadores extraídos de la zanja 33.

El análisis del desplazamiento de los trazadores de la zanja 33 muestra un máximo de 18 metros.

El desplazamiento promedio permite estimar el radio de la zona de extracción, a las 160 kton. El desplazamiento es calculado respecto del punto de extracción de salida del trazador, por lo tanto, el desplazamiento al punto medio de la batea o lo que es lo mismo el radio del elipsoide asociado a la batea se estima en  $18 \pm 6$  m.

## 4.2.5 Zanja 34

### Índice de Uniformidad (VUI)

Mediante este índice se evalúa la extracción de los puntos que componen esta zanja, E5734F y E5934H, para definir si estos puntos fueron extraídos de forma uniforme, aislada o semiuniforme, con respecto a sus vecinos cercanos. Las figuras 4-29 y 4-30 presentan la evolución del VUI para ambos puntos.

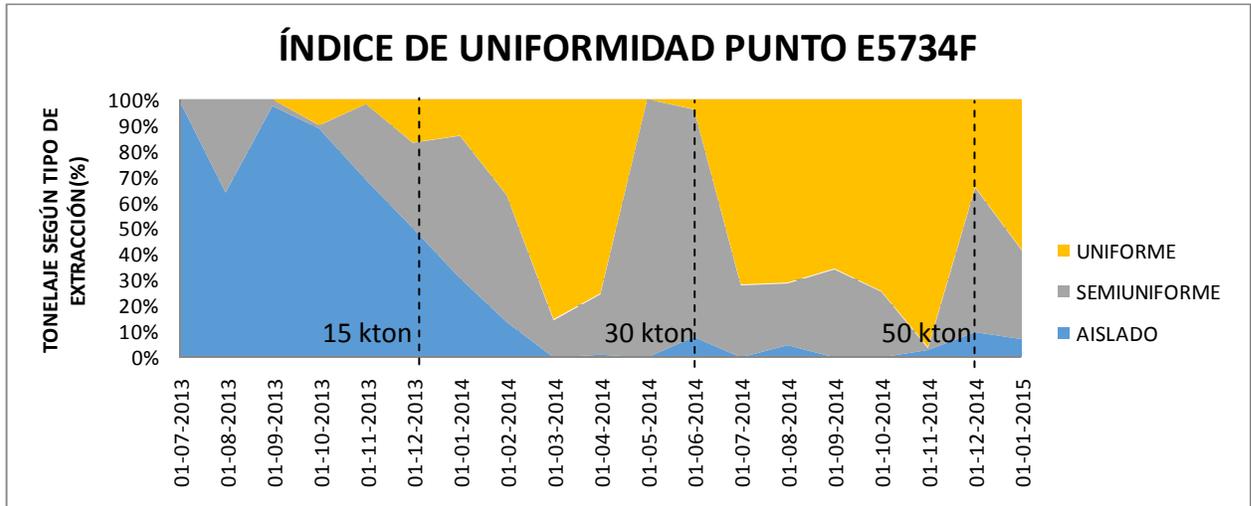


Figura 4-29: Evolución índice de uniformidad punto E5734F.

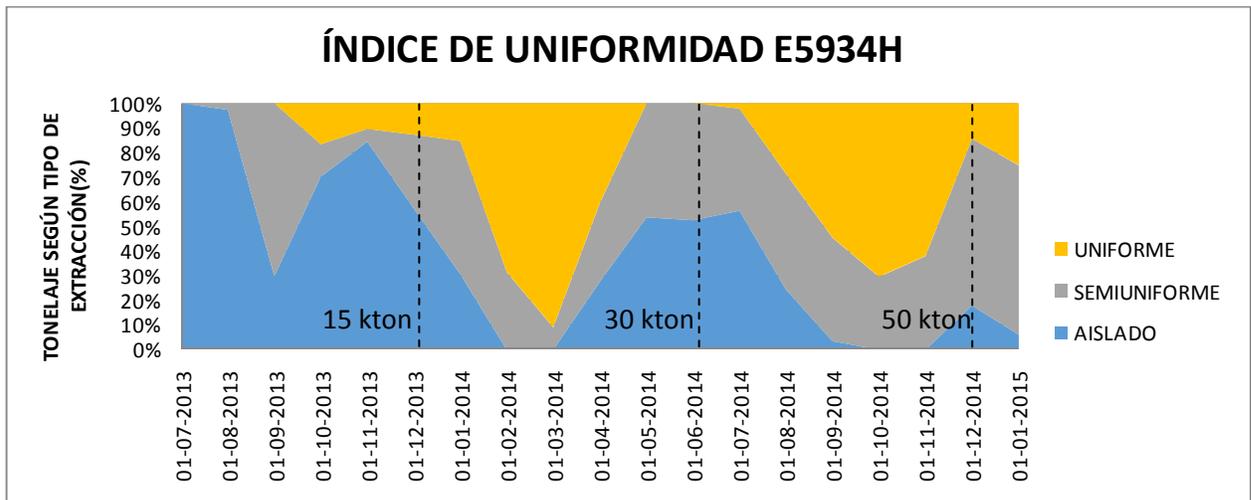


Figura 4-30: Evolución índice de uniformidad punto E5934H.

El análisis del índice de uniformidad se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >], [15 kton – 30 kton >], [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: se observa que durante el intervalo de análisis ambos puntos experimentan similar proporción del índice de uniformidad (3% y 4% de extracción uniforme para los puntos E5734F y E5934H respectivamente).

En consecuencia ambos puntos de extracción exhiben gran proporción de tiraje uniforme y semiuniforme, el punto E5734F presenta un 60 % de extracción aislada, mientras que el punto E5934H un 59 %.

[15 kton – 30 kton >: Durante este intervalo ambos puntos experimentan porcentajes de uniformidad muy similares, 45% para el punto E5734F y 48% para el punto E5934H. La diferencia más significativa se observa en el porcentaje de extracción aislada, 12 % para el punto E5734F y 25% para el punto E5934H.

[30 kton – 50 kton]: Este rango de análisis muestra que el punto E5734F presenta una mayor proporción de extracción uniforme 42 %, mientras que el punto E5934H exhibe un 31 %.

### Análisis local de extracción de los puntos que componen la zanja

Los puntos E5734F y E5934H componen esta batea. El tonelaje acumulado de la batea y la diferencia de tonelaje se muestran la figura 4-31. Se observa que la diferencia de tonelaje durante el periodo de extracción es menor a 1 kton en promedio.

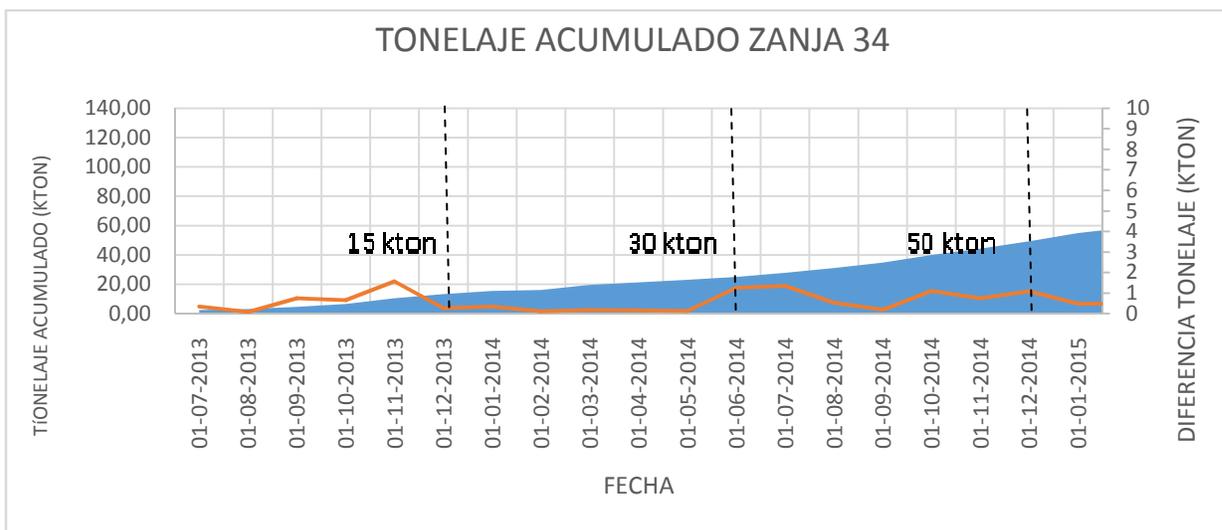


Figura 4-31: Detalle de extracción de la batea 34. Tonelaje acumulado y diferencia de tonelaje de los puntos que componen la batea.

## Análisis granulométrico

El análisis de la granulometría se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton]

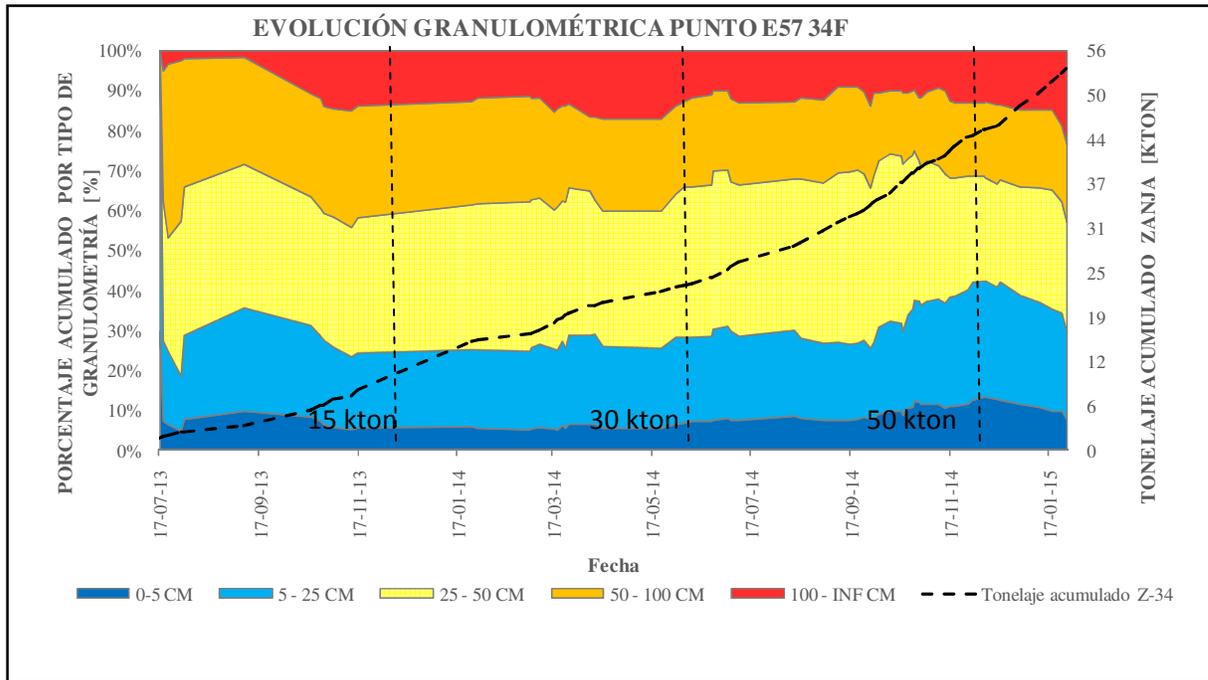


Figura 4-32: Evolución granulométrica punto E5734F.

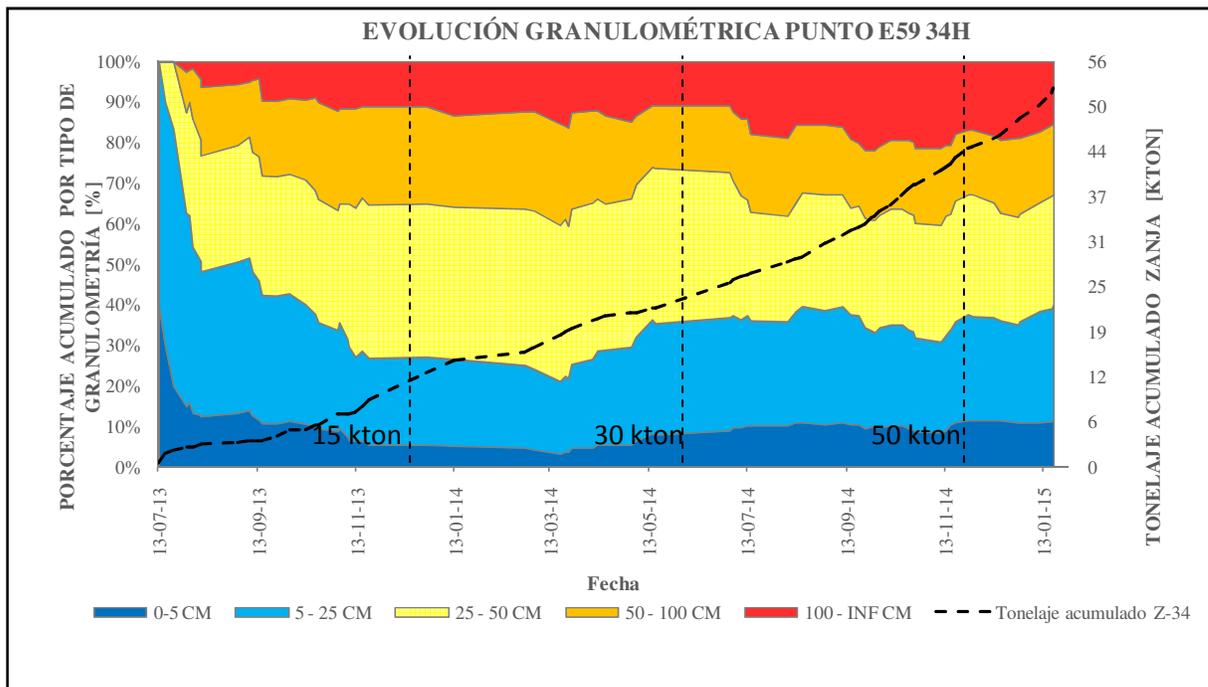


Figura 4-33: Evolución granulométrica punto E5934H.

El análisis de la evolución granulométrica de los puntos se realiza tomando en consideración 3 periodos dentro del intervalo de extracción, [0 kton – 15 kton >, [15 kton – 30 kton >, [30 kton – 50 kton].

[0 kton – 15 kton >: se observa que el punto E5934H presenta un 23% de material de menor tamaño (0 cm – 25 cm), mientras que el punto E5734F acumula un 15%.

[15 kton – 30 kton >: Para este intervalo ambos puntos exhiben granulometrías muy parecidas. No existe diferencia de más de 5% en la comparación de cada una de las categorías granulométricas de estos dos puntos.

[30 kton – 50 kton]: Al igual que en el intervalo anterior, los puntos no exhiben diferencias significativas en la comparación de cada una de las categorías.

### Zona de extracción

La figura 4-34 muestra la zona de extracción según los datos mina. La primera imagen es una vista longitudinal a través de la zanja (Norte = -4.5 m), la segunda una vista en perfil (Este= 1664 m).

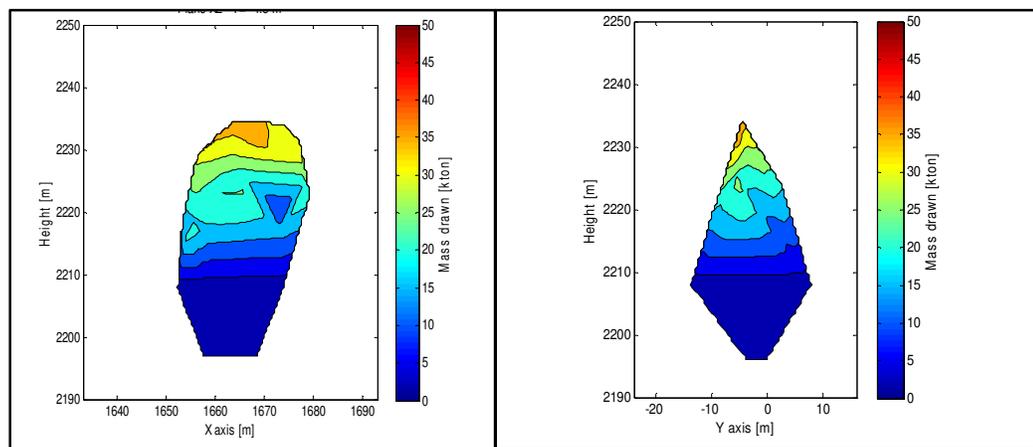


Figura 4-34: interpolación de la zona de extracción zanja 34. Vista transversal (izquierda) y longitudinal (derecha)

### Análisis desarrollo de la zona de extracción

[0 kton – 15 kton>: La comparación de extracción de estos dos puntos no muestra una diferencia de extracción en los puntos que componen la batea. El VUI muestra ambos puntos experimentan gran proporción de extracción aislada 60% de extracción aislada para el punto E5734F y 50% de extracción aislada para el punto E5934H. El análisis granulométrico muestra que el punto E5934H presenta mayor porcentaje, 23%, de material entre [0 cm – 25 cm].

El desarrollo de la zona de extracción se inicia simultáneamente entre los puntos que componen la batea. Aunque los puntos exhiben gran proporción de extracción aislada y existe mayor ingreso de mineral de menor tamaño por el punto E5934H, la zona de extracción se desarrolla de forma regular y estratificada en la vertical.

[15 kton – 30 kton>: La comparación de la carta de extracción entre ambos puntos no muestra alguna diferencia significativa. El desarrollo del VUI tampoco muestra diferencias apreciables en el porcentaje de extracción uniforme, diferencia de 3%. La granulometría de los puntos E5734F y E5934H se desarrolla de forma parecida sin mayores contrastes que reportar.

Debido al igual desarrollo de los parámetros que condicionan el flujo éste se desarrolla de forma regular y estratificada sin singularidades.

[30 kton – 50 kton>: La comparación de la carta de extracción entre ambos puntos evoluciona de forma similar. El desarrollo del VUI muestra que el punto E734F exhibe una mayor proporción de extracción uniforme que el punto E5934H, 42% y 31% respectivamente. La curva granulométrica de los puntos se desarrolla de forma muy parecida sin mayores contrastes.

A pesar de la diferente uniformidad de los puntos E5734F y E5934H, la zona de extracción se desarrolla de forma regular sin presencia de perturbaciones puntuales.

### Resumen del análisis:

Del análisis del flujo de la zanja 34 se verifica como principal parámetro de flujo al VUI.

Cuando el VUI de los puntos que componen la zanja en análisis es parecido, diferencias de hasta 11% en extracción uniforme, el flujo de mineral se desarrolla de forma regular y estratificada.

La figura 4-35 muestra el movimiento horizontal de los datos mina.



Figura 4-35: Detalle desplazamiento de los trazadores extraídos de la zanja 34.

El análisis del desplazamiento de los trazadores de la zanja 33 muestra un máximo de 18 metros.

El desplazamiento promedio permite estimar el radio de la zona de extracción, a las 120 kton. El desplazamiento es calculado respecto del punto de extracción de salida del trazador, por lo tanto, el desplazamiento al punto medio de la batea o lo que es lo mismo, el radio del elipsoide asociado a la batea se estima en 18+/- 6 m.

#### 4.2.6 Principales conclusiones del análisis de las zonas de extracción

Se observa que el tiraje tiene un papel preponderante en el desarrollo de la zona de extracción. En particular se observan tres consecuencias importantes sobre el flujo de material, si los dos puntos son igual de uniforme, seminuniforme o aislado (60 % del intervalo como aislado), la granulometría juega un rol secundario y se evidencia el desarrollo regular de la zona de extracción. Por otro lado, cuando los puntos presentan un porcentaje de tiraje aislado mayor al 60 % siempre se desarrolla flujo irregular sin importar la granulometría de extracción. Solo cuando el tiraje de los puntos presenta diferencia en valor del índice de uniformidad, la granulometría presenta un papel más significativo.

Tabla 4-1: Resumen principales conclusiones de cada una de las zanjas.

Resumen principales conclusiones de cada una de las zanjas					
Zanja	características del VUI	Diferencia granulométrica de material grueso (> 100 cm)	Pulsos de sobre-extracción	Tipo de Flujo	Observaciones
30	no uniforme en ambos puntos	6%	si	Regular	
31	no uniforme en ambos puntos	-	no	Preferencial	Posible colgadura
32	semi-uniforme en ambos puntos	15%	no	Regular	
33	80% aislado en ambos puntos	1%	no	Irregular	
34	5% uniforme en ambos puntos	-	no	Regular	

#### 4.3 Análisis de trazadores de campo cercano remanentes

El análisis de los trazadores de campo cercano continúa con el estudio de aquellos trazadores pertenecientes a esta clasificación, que no fueron recuperados durante el intervalo de análisis, 2012 – 2015. Los trazadores remanentes suman 72, lo que representa un porcentaje de 46% del total de trazadores de campo cercano posicionados al inicio del estudio.

Las figura 4-36 y 4-37 presentan una imagen en planta e isométrica respectivamente de los trazadores remanentes y recuperados.

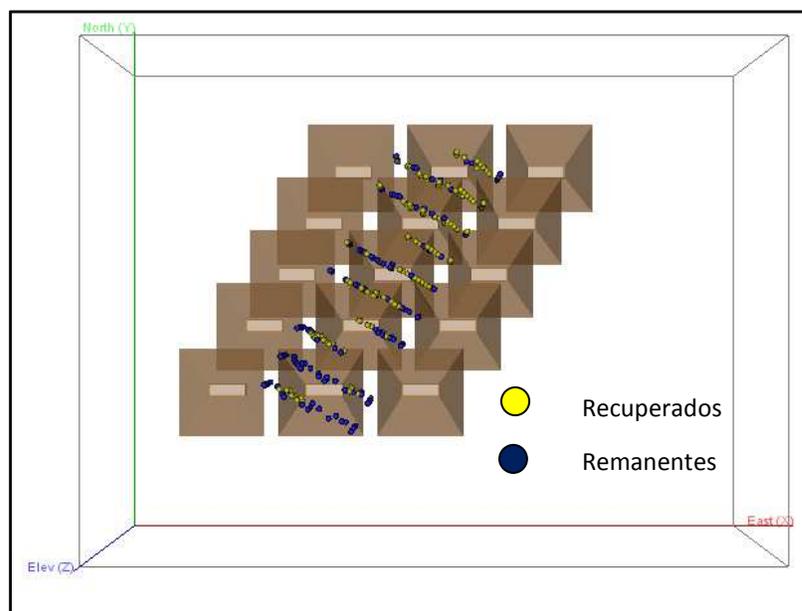


Figura 4-36: Vista en planta de trazadoras recuperadas y remanentes durante el intervalo de análisis, agosto 2012- enero 2015.

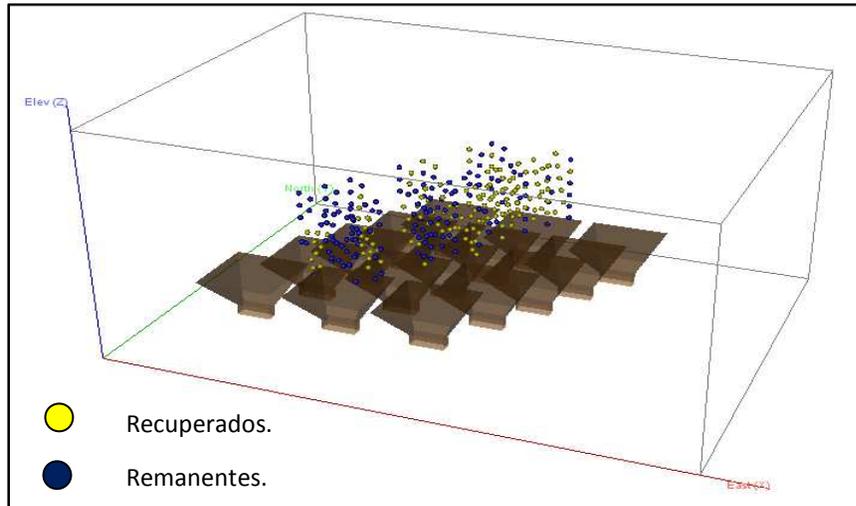


Figura 4-37: Vista isométrica de trazadores remanentes y recuperados durante el intervalo de estudio, agosto 2012- enero 2015.

Las imágenes anteriores permiten visualizar y ubicar tanto los trazadores recuperados, amarillos, como remanentes, azules.

El estudio conjunto de todos los trazadores presenta las siguientes características:

- Los trazadores remanentes se ubican preferencialmente en la periferia del sector de análisis.
- Se evidencia la existencia de sectores preferenciales de no extracción por sobre el pilar mayor de las bateas en análisis. Esta característica permite medir la altura de interacción para cada una de las bateas en análisis, 25 +/-3 m.
- Aspecto relevante es la existencia en algunos casos de trazadores remanentes por debajo de trazadores recuperados. Detalle que da cuenta de la geometría irregular puntual de las zonas de extracción, ver figura 4-38.

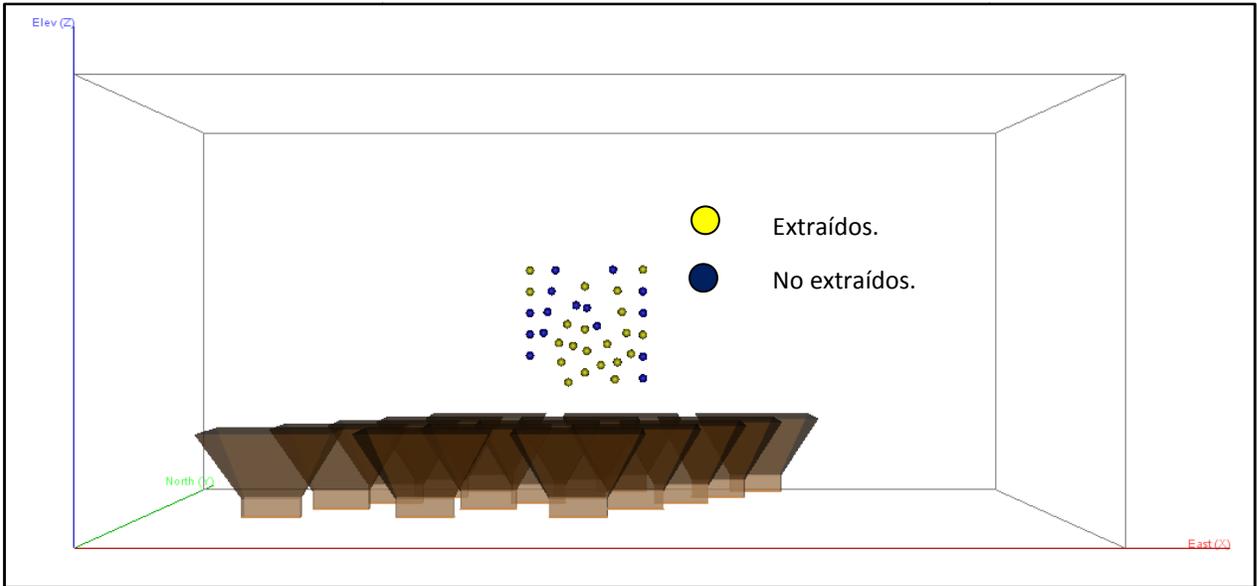


Figura 4-38: Vista transversal de la zanja 32. Se observa el detalle de trazadores remanentes, azules, en los bordes.

#### 4.4 Trazadores de largo alcance

Los trazadores de largo alcance son aquellos posicionados cerca de los 100 metros por sobre el nivel de hundimiento. Los trazadores totalizan 210, de los cuales se extrajeron 17, es decir, 8 % del total.

La figura 4-39 muestra la ubicación de los trazadores recuperados.

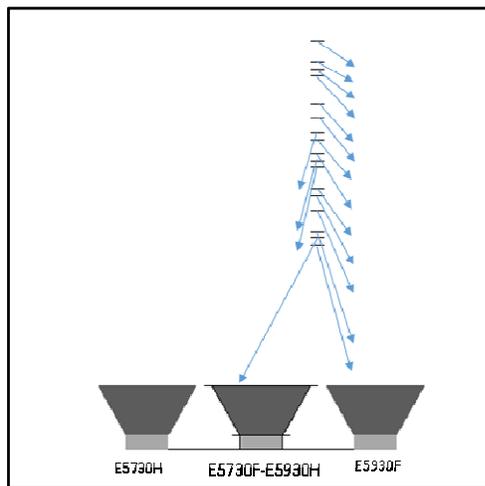


Figura 4-39: Ubicación de trazadores de largo alcance recuperados. Las flechas indican la dirección de movimiento de los trazadores.

Los trazadores recuperados fueron preferencialmente aquellos ubicados en las inmediaciones de la zanja 30, recuperados desde los puntos E5730F, E5930H, E5930F.

El análisis para estos trazadores tiene similar metodología que el llevado a cabo para los trazadores de campo cercano.

Dado el porcentaje de los trazadores recuperados, las observaciones aquí documentadas son de carácter preliminar.

El análisis toma en cuenta los siguientes puntos:

- Carta de extracción de trazadores.
- Granulometría.
- Movimiento de trazadores.
- Altura real, posicionamiento, y altura de extracción.

#### 4.4.1 Índice de uniformidad

El índice de uniformidad de los tres puntos permite caracterizar la forma de tiraje realizada para los puntos en análisis, durante el intervalo de análisis agosto 2012 – enero 2015. El análisis del tiraje permite relacionar implicancias del tiraje sobre la salida de los trazadores. La siguiente tabla muestra los resultados del índice para los puntos E5730F, E5930H y E5930F.

Tabla 4-2: Tabla resumen de los tipos de extracción de los puntos E5730F, E5930H y E5930F durante el intervalo de análisis.

	TIPO DE EXTRACCIÓN VUI		
	E5730F	E5930H	E5930F
<b>NO EXTRACCIÓN</b>	33%	27%	28%
<b>DESUNIFORMIDAD</b>	23%	25%	23%
<b>SEMIUNIFORME</b>	39%	42%	39%
<b>UNIFORME</b>	5%	6%	10%

El análisis del índice de uniformidad muestra que el punto E5930F presenta ligeramente una mayor uniformidad que los puntos E5730F y E5930H. Al igual que en el caso de corto alcance, la uniformidad juega un rol importante en el desarrollo de la zona de extracción. Se puede afirmar que dada la extracción aislada de los puntos se espera un desarrollo irregular de cada una las zonas de extracción, y, en consecuencia, una obtención poco equitativa de los trazadores de campo lejano para los tres puntos de extracción, conclusión alineada con los datos obtenidos. Es importante destacar que la visualización de la zona de flujo debe de hacerse con la interpolación de la zona de extracción mediante Matlab, pero dado los pocos datos de campo lejano esto no fue posible.

#### 4.4.2 Carta de extracción detalle

Como se mencionó anteriormente, los trazadores extraídos fueron recuperados desde los puntos E5730F, E5930H, E5930F; de acuerdo a esto, el análisis de la carta de extracción debe tomar en cuenta estos puntos. La figura 4-40 muestra el tonelaje acumulado de cada uno de los tres puntos de extracción mencionados anteriormente, se introduce como referencia el tonelaje total de la suma de estos tres puntos.

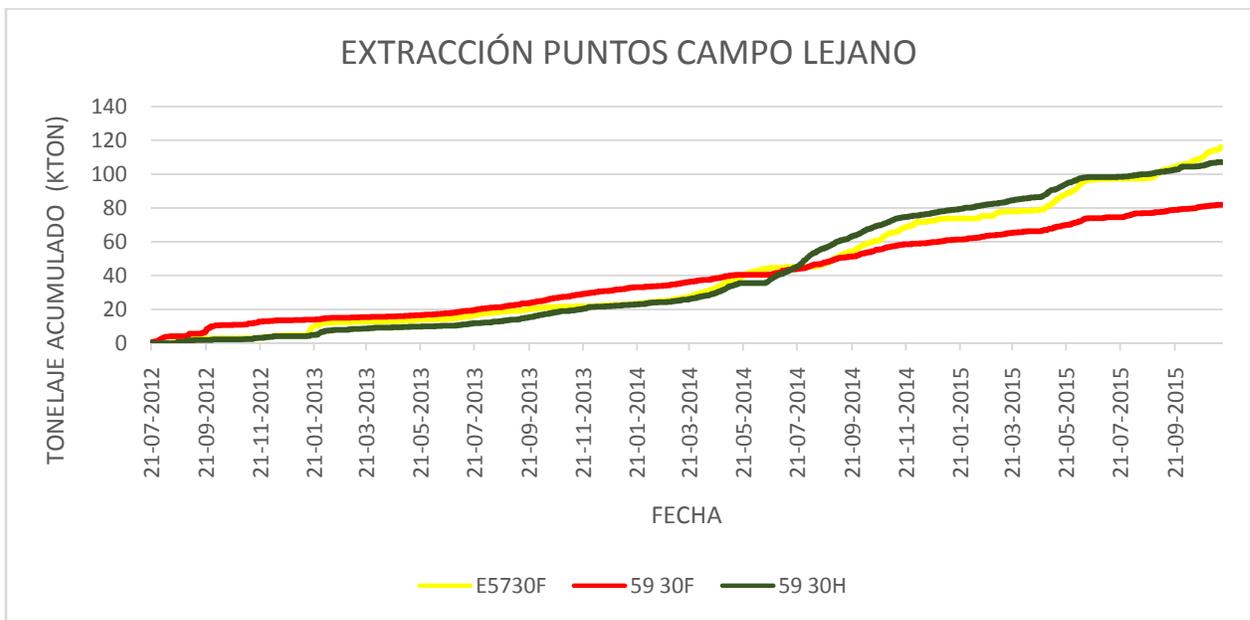


Figura 4-40: Tonelaje acumulado de los puntos por donde se extrajeron los trazadores de campo lejano, E5730F, E5930H y E5930F.

De la figura 4-40, se observa que por poco más de la primera mitad del intervalo en estudio existe una mayor extracción por el punto E5930F. Esta característica condiciona el desarrollo de la zona de extracción, haciendo que la mayor parte de material obtenido, y por lo tanto trazadores, se obtengan por el punto E5930F.

Tabla 4-3: ubicaciones de los trazadores de campo lejano.

Resumen Salida trazadores campo lejano			
Posicionamiento			Punto de salida
X	Y	Z	
1721	67	2308	E5930F
1721	67	2302	E5930F
1721	67	2300	E5930F
1721	67	2298	E5930F
1721	67	2290	E5930F
1721	67	2286	E5930F
1721	67	2282	E5930H
1721	67	2280	E5930F
1721	67	2276	E5930F
1721	67	2274	E5930H
1721	67	2272	E5930H
1721	67	2266	E5930F
1721	67	2264	E5930F
1721	67	2260	E5930F
1721	67	2254	E5930F
1721	67	2252	E5730H
1721	67	2250	E5930F

### 4.4.3 Granulometría

La inspección de la granulometría obtenida para los tres puntos muestra que para los puntos E5930H y E5930F existe una disminución de material grueso desde el inicio de la extracción.

La obtención de mayor material grueso al inicio de la extracción, producto de la irregularidad de tiraje, condiciona el desarrollo regular de cada una de las zonas de extracción de los puntos bajo análisis. La extracción inicial de material grueso permite la formación de arcos inestables que provocan la extracción de zonas preferenciales de la columna de material. La disminución de material grueso (> 100 cm) permite prever una disminución de la zona del diámetro de la zona de extracción para este campo de trazadores, campo lejano.

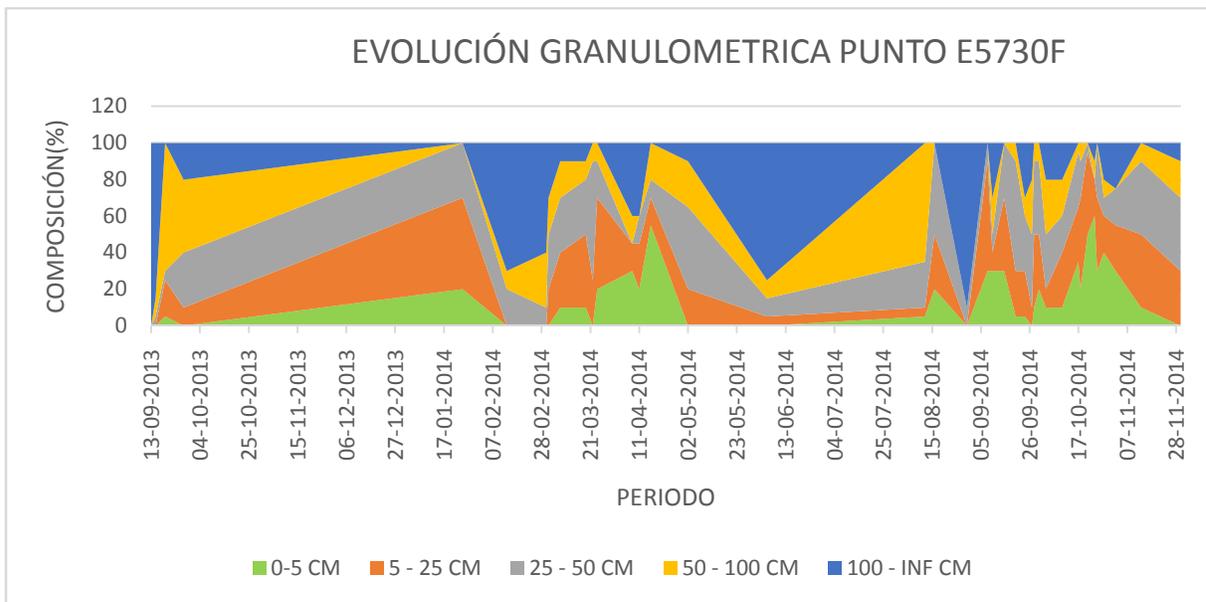


Figura 4-41: Evolución granulométrica punto E5730F.

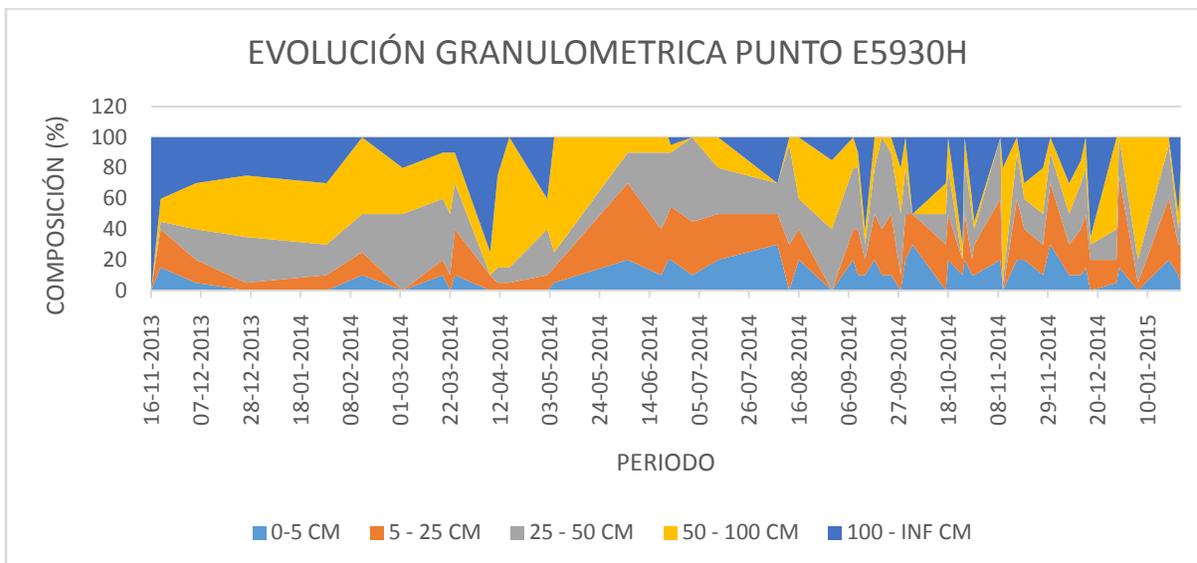


Figura 4-42: Evolución granulométrica punto E5930H.

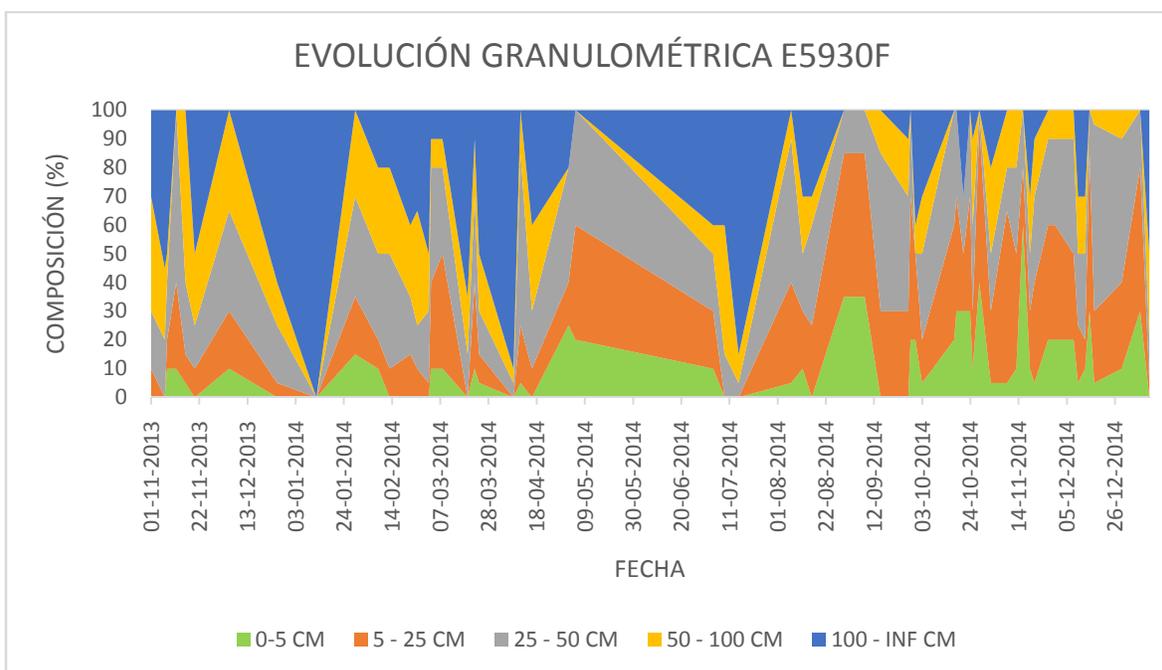


Figura 4-43: Evolución granulométrica del punto E5930F

#### 4.4.4 Comparativa altura real y de extracción de trazadores de campo lejano

El estudio de las alturas de posicionamiento y de extracción permite comprender de mejor manera el detalle del movimiento de los trazadores. De la figura 4-44 se observa que los trazadores se extraen a una menor altura que aquella a la que fueron emplazados. Esta diferencia permite concluir que la columna donde se encuentran ubicados los trazadores está influenciada

por las zonas de flujo de los puntos adyacentes, los trazadores extraídos son aquellos que se ubicaron sobre el pilar mayor ubicado en la calle 59.

La altura de extracción se calcula como el cociente entre el tonelaje acumulado de extracción, del trazador respectivo, y el área de influencia del punto por donde se recuperó el trazador bajo análisis.

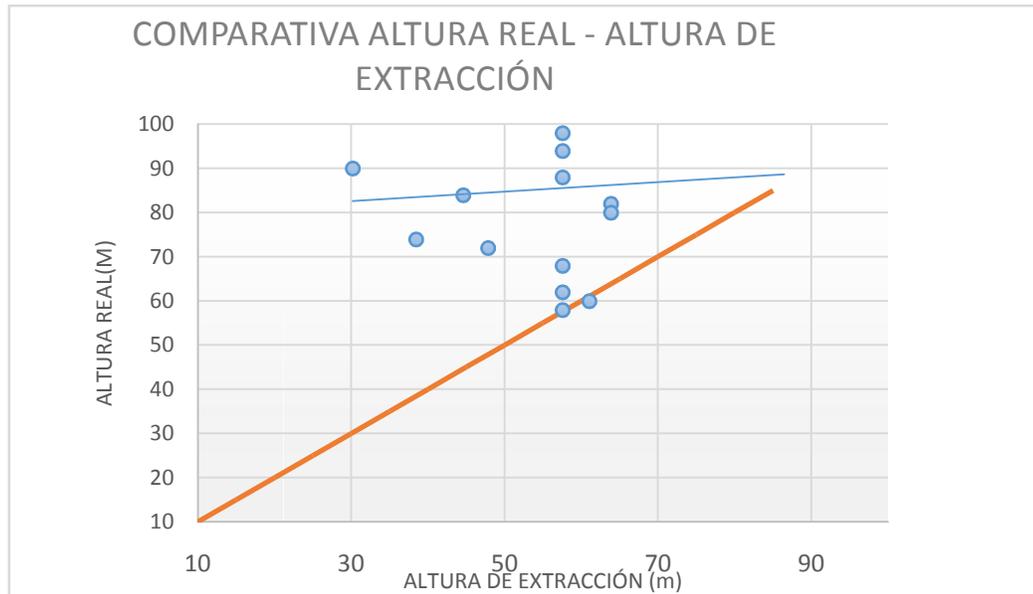


Figura 4-44: comparación de altura de extracción versus altura real de posicionamiento de trazadores de campo lejano.

La menor altura de extracción permite enunciar que el elipsoide de extracción que envuelve estos puntos tiende a crecer más rápido en altura que en diámetro, punto E5930F, de esta forma se puede explicar el por qué de la menor altura de extracción con respecto a la ubicación inicial de los trazadores. De las figuras 4-41, 4-42 y 4-43 se observa que la granulometría va disminuyendo a medida que la extracción se sucede, razón que explica la contracción del diámetro.

#### 4.4.5 Movimiento de trazadores

El movimiento de trazadores permite cuantificar el grado de desplazamiento que tuvieron durante el proceso de extracción. La figura 4-45 muestra la frecuencia de desplazamiento de los trazadores observada. Cabe mencionar que se trata del desplazamiento horizontal, calculado como la distancia entre la ubicación original de los trazadores y la ubicación del punto por donde se extrajeron.



Figura 4-45: Histograma del movimiento de trazadores de campo lejano.

El gráfico muestra una media de desplazamiento de 11 m. El análisis previo de los trazadores de campo cercano evidencia que en promedio el desplazamiento de las elipses de extracción es de 18 metros. Los trazadores de campo lejano fueron posicionados hasta los 100 metros por sobre el nivel de hundimiento de acuerdo a los datos. Para esta altura, el diámetro de la zona de movimiento es entonces 22 m, lo que implica una reducción del diámetro de la zona de flujo.

#### 4.6 Análisis conjuntos trazadores de campo cercano y lejano

El ejercicio del estudio conjunto de los marcadores de campo cercano y lejano permite tener una visión general del flujo sobre la zona en estudio. El análisis de la altura de extracción (altura estimada mediante el área de influencia por punto) de los trazadores recuperados, permite inferir cómo evoluciona la zona de extracción en el tiempo, su forma y detectar particularidades que los datos puedan proporcionar. La figura 4-46 permite comparar la altura de extracción con respecto a la altura de posicionamiento de cada uno de los trazadores recuperados, tanto de campo cercano como lejano.

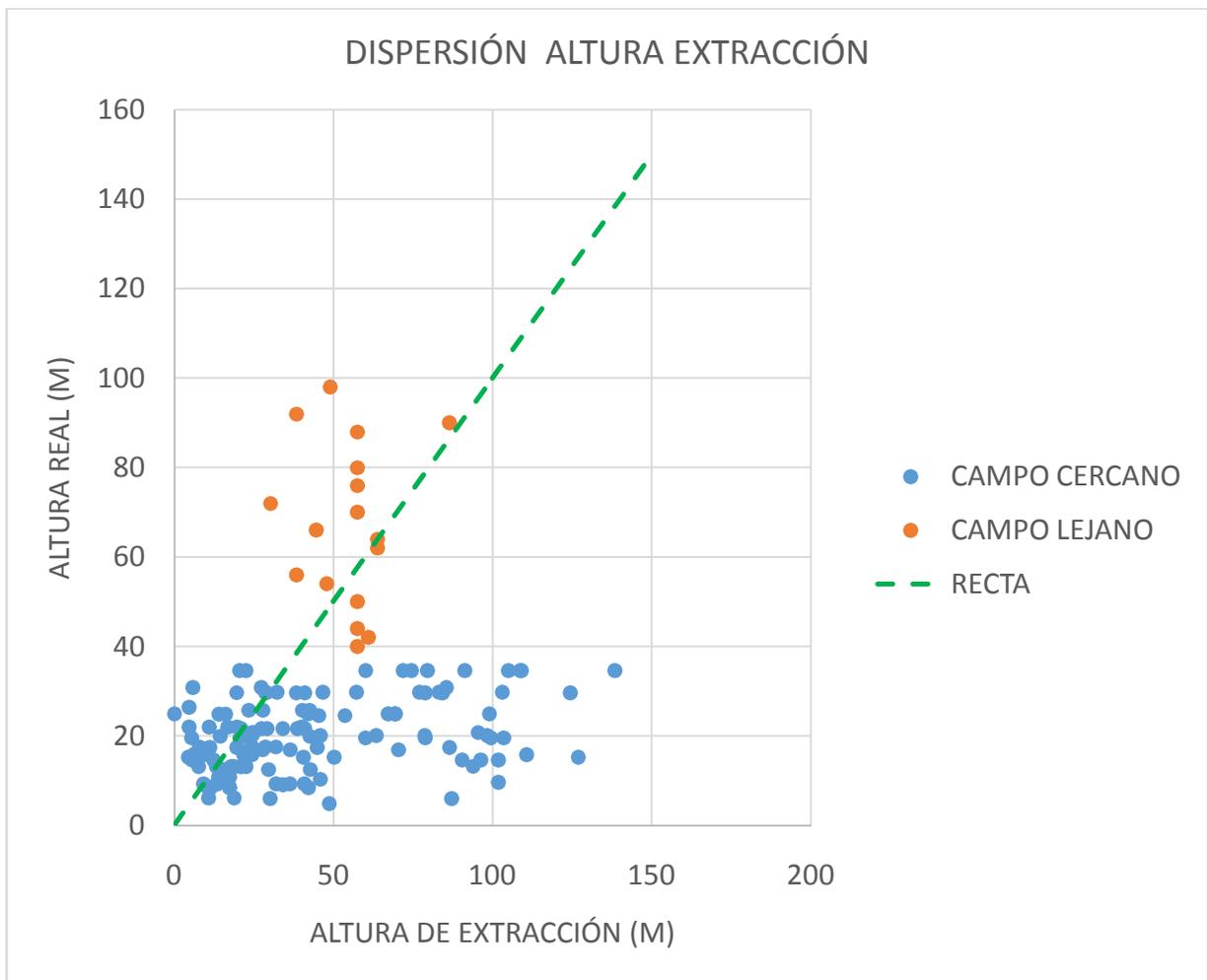


Figura 4-46: Altura de extracción versus altura real de posicionamiento de trazadores.

Es importante detallar el cálculo de altura de extracción. Esta se calcula como el cociente entre el tonelaje acumulado de extracción, del trazador respectivo, y el área de influencia del punto por donde se recuperó el trazador bajo análisis.

$$H_{extracción} = \frac{\text{Tonelaje de extracción}}{\text{Área de influencia}}$$

Del gráfico anterior, se observa que existen trazadores de campo cercano que son recuperados a una mayor altura de extracción que algunos trazadores de campo lejano, es decir, son extraídos más tarde dentro del punto de extracción respectivo. Se advierte entonces que, para una altura de extracción de 50 metros, ya existen trazadores de campo lejano dentro de la zona de extracción. Por otro lado, permanecen trazadores de campo cercano en su posición original. A partir de esta observación y con el dato de menor movimiento horizontal de los trazadores de campo lejano, se infiere que la contracción del diámetro de la zona de extracción se desarrolla a partir de los 50 metros de altura sobre el nivel de hundimiento.

En base a lo anterior se plantea la geometría de la zona de extracción hasta los 100 m. La figura 4-47 presenta un bosquejo.

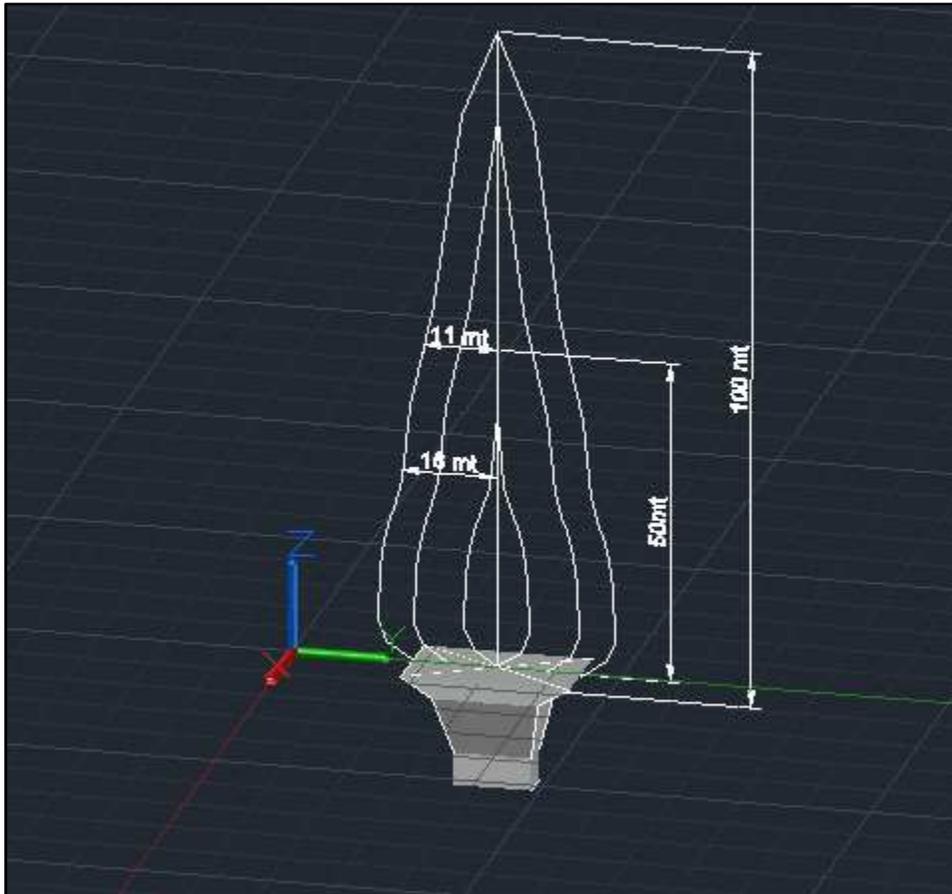


Figura 4-47: Geometría de la zona de extracción, cálculo en base a la totalidad de trazadores, campo cercano y lejano.

La geometría de extracción del gráfico anterior muestra una forma distinta a la planteada en la literatura (Laubscher; Heslop; Marano).

## 4.7 Estudio conciliación de datos con simulaciones FlowSim

### 4.7.1 Calibración de FlowSim

El proceso de calibración toma en consideración los trazadores recuperados de las 5 bateas bajo análisis. La calibración modela el flujo de mineral internalizando sus características en los parámetros de ajuste N, Cv y M. De este modo, el procedimiento de calibración considera la variación de estos parámetros para obtener los resultados más representativos del mineral particular en análisis. En este caso, la representatividad del modelo se evalúa considerando que tan parecidos son los tonelajes de extracción de trazadores simulados y aquellos ubicados en terreno. Además, se considera la forma de las zonas de extracción y la réplica en la ubicación de la salida de los trazadores (de los 138 trazadores obtenidos a la fecha). El intervalo de variación de cada parámetro fue de 2-4 y 3-5 para Cv y N respectivamente; mientras que el parámetro M se varió desde 0 a 4.

El proceso de calibración consiste en realizar una primera inspección de error considerando solo los parámetros Cv y N, para ello se varía estos parámetros y se obtiene los valores de estos que muestran menor error. Luego de encontrar los parámetros Cv y N con menor error, se realizan nuevas simulaciones manteniendo los parámetros Cv y N constantes mientras se varia el parámetro M, el resultado de esta segunda etapa es la obtención del set de parámetros Cv, N y M que mejor ajustan los tonelajes de salida de los trazadores.

La figura 4-48 presenta la metodología de calibración empleada.

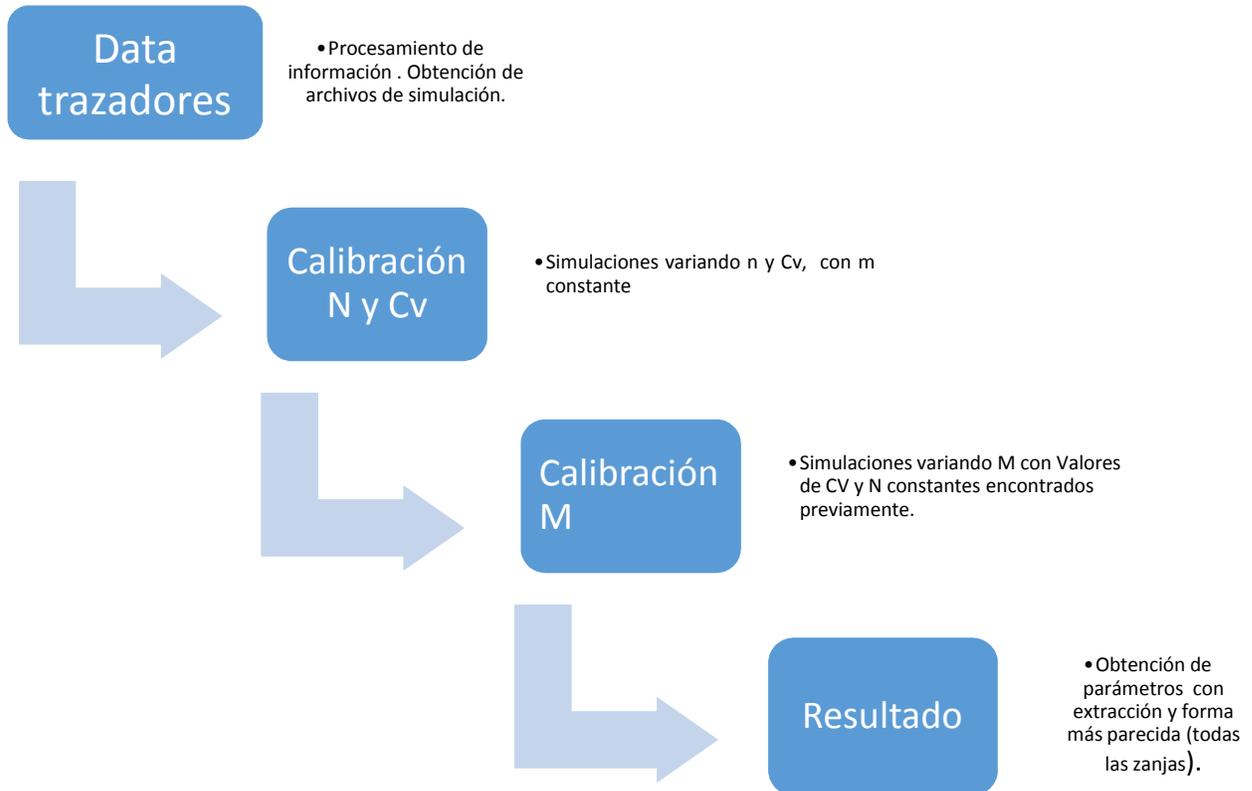


Figura 4-48: Metodología de calibración.

La figura 4-49 presenta la zona de extracción de la batea 31 obtenida mediante la calibración. Se puede apreciar una vista longitudinal y transversal de la batea 31.

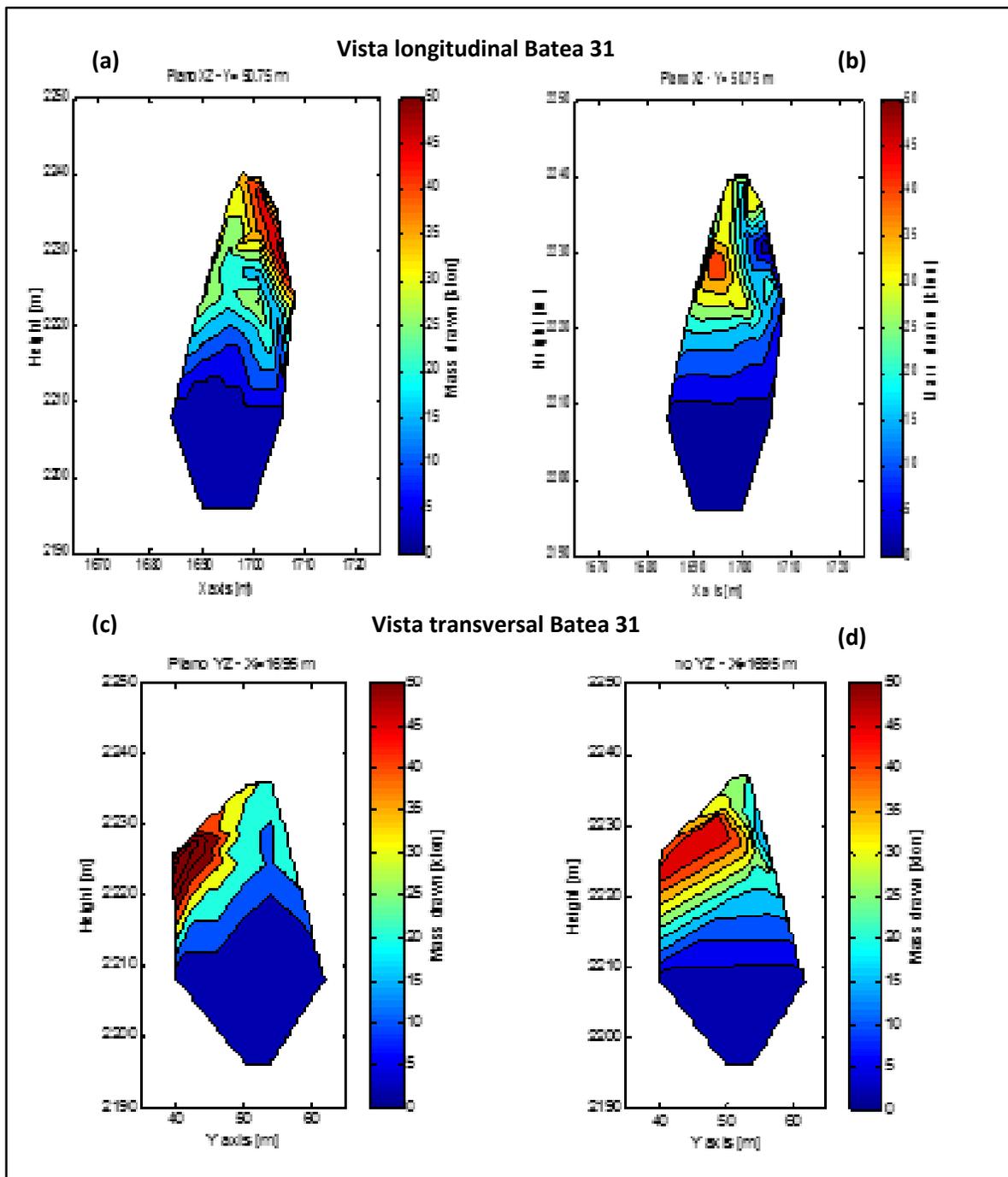


Figura 4-49: Zonas de extracción simulada y real de la batea 31. (a) Zona de extracción simulada, vista (Oeste-Este), cota Norte 50.75 m. (b) Zona de extracción real, vista (Oeste-Este), cota Norte 50.75 m. (c) Zona de extracción simulada, vista (Norte-Sur), cota Este 1695 m. (d) Zona de extracción real, vista (Norte-Sur), cota Este 1695 m.

La figura 4-49 muestra los resultados de la batea 31. A la izquierda se observa los resultados del simulador calibrado y a la derecha los datos mina. La primera fila es en dirección Oeste-Este (Norte= 50.75) a través del punto medio de la batea; la segunda fila es en dirección Norte-Sur

(E=1695), también a través del punto medio de la batea. El detalle de las demás bateas se puede observar en la sección anexo A.

La tabla 4-4 y 4-5 presenta el resumen de los resultados obtenidos para el proceso de calibración de los parámetros Cv, n y m.

Tabla 4-4: Resumen calibración parámetros Cv-n.

<b>Resumen Calibración Cv - n</b>				
Réplicas de trazadores	Cv	n	Error medio (Kton)	Desv (Kton)
98	2	3	23	25
88	2	4	24	29
96	2	5	43	43
93	2	6	33	38
90	3	3	22	29
99	3	4	29	33
94	3	5	29	34
94	3	6	34	44
89	4	2	19	25
97	4	3	22	27
98	4	4	21	26
97	4	5	25	34

Tabla 4-5: Resumen calibración parámetro M

<b>Resumen Calibración M</b>					
Réplicas de trazadores	Cv	n	M	Error medio (Kton)	Desv (Kton)
98	4	4	0	21	18,5
114	4	4	0,5	19	22
115	4	4	1	20	19,3
112	4	4	1,5	18	17,1
111	4	4	2	17	19
113	4	4	2,5	16	14,4
116	4	4	3	16	18,2
104	4	4	3,5	17	17
109	4	4	4	19	16

Dado que la calibración por parte del tonelaje de extracción es trazadora a trazador, es decir es de orden puntual, los errores obtenidos son significativos. No obstante, la comparación de las zonas de extracción evidencia una similitud aceptable, ver figura 4-49. Los parámetros que mejor ajustan la salida de los trazadores mina son  $C_v=4$ ,  $n=4$  y  $m=3$  con un error promedio de 16 Kton

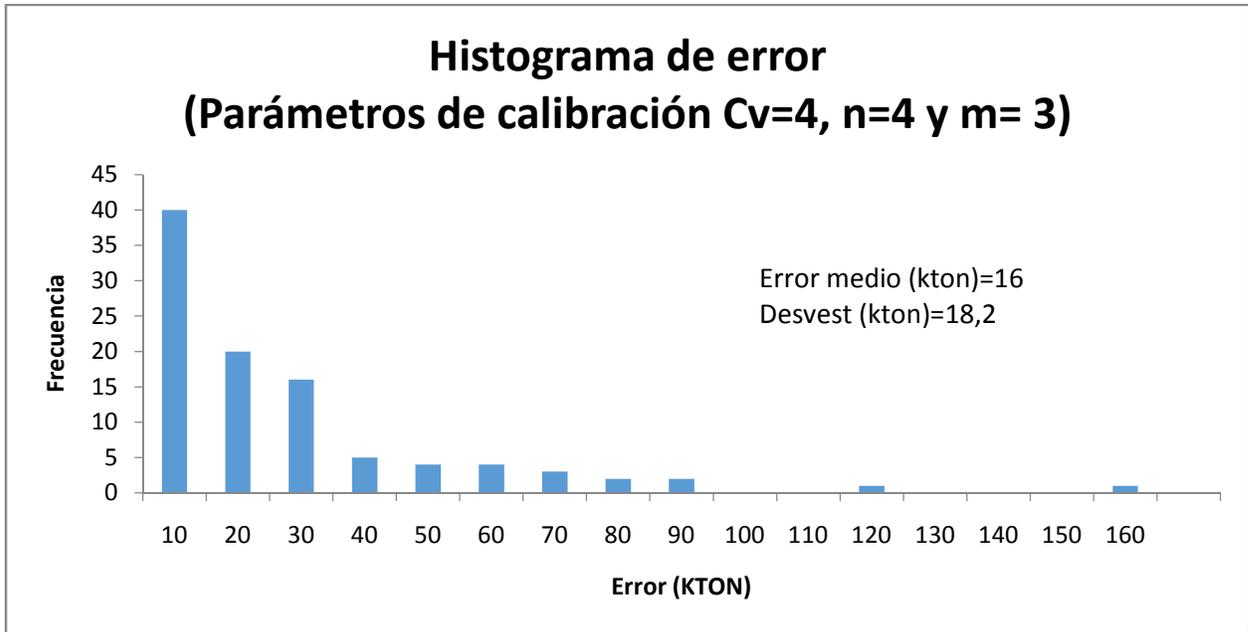


Figura 4-50: Distribución de error para la predicción del tonelaje de salida de los trazadores con FlowSim calibrado.

#### 4.7.2 Análisis de calibración campo cercano

En esta sección se presenta los resultados obtenidos luego del proceso de calibración del simulador FlowSim. Al término del proceso de calibración se obtiene el set de parámetros  $C_v=4$ ,  $N=4$  y  $M=3$ ; este set de parámetros fue el que muestra menor error de predicción respecto del tonelaje de extracción de los trazadores. Como se explica en el segundo capítulo, los parámetros  $C_v$ ,  $N$  y  $M$  forman parte de las variables de ajuste del simulador. FlowSim es una herramienta de modelación que debe ser calibrada a las condiciones particulares del sistema bajo análisis, es en este punto en el que los parámetros de ajuste  $C_v$ ,  $N$  y  $M$  fundamentan su utilización, ya que, en estos parámetros recae la internalización de las condiciones del lugar estudiado. Para más detalle de estos parámetros dirigirse al capítulo de antecedentes.

El parámetro  $M$  muestra su utilidad en la caracterización de la granulometría de las distintos intervalos de la columna de mineral. Entre los primeros 100 m de la columna se efectúa el pre-acondicionamiento, luego de los 145 m se obtiene material quebrado proveniente de la explotación previa del nivel superior, material con granulometría menor. Por esta diferencia se coloca distinta calidad de RMR, 60 para los primeros 100 y 20 para el material por sobre los 145 m. Gonzalez (2015) plantea que los valores recomendados de RMR para el material fino y material promedio es de 10 y 70 respectivamente. Dado que el material quebrado no es tan fino y el material de los primeros 100 m es sometido a pre-acondicionamiento se considera apropiado usar los valores 60 para los primeros 100 m, 70 para el intervalo de 100 m a 145 m y 20 para el material por sobre los 145 m.

La figura 4-51 presenta los resultados obtenidos luego del proceso de calibración.

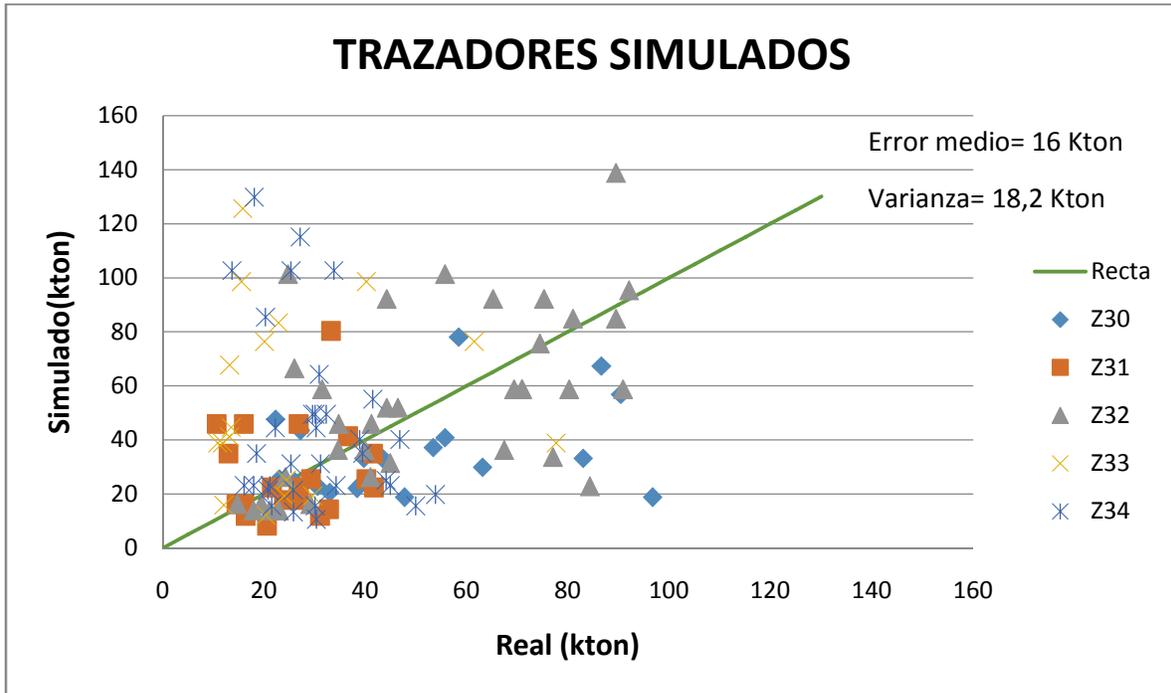


Figura4-51: Comparativa de tonelajes simulados y reales de recuperación de trazadores.

Como se observa, de la figura 4-51 no se aprecia una tendencia de sobreestimación o subestimación, motivo que permite concluir que el programa realiza las simulaciones de forma inesgada. Los datos muestran que las simulaciones de la batea 31 son los que mejor se replican. Del análisis de las zonas de extracción para cada batea hecho previamente, se concluye que la uniformidad de extracción tiene un papel fundamental en el desarrollo del flujo de mineral. Sin embargo, se evidencia que cuando el tiraje de los puntos que componen la batea presenta diferente porcentaje de uniformidad, la granulometría ejerce un rol predominante en el direccionamiento del flujo. Dado que FlowSim no modela la granulometría es esperable en cierta medida el error encontrado. Es cierto que FlowSim entrega mayor/menor movilidad de acuerdo al parámetro RMR, sin embargo, dado que las calibraciones tienen incorporada esta diferencia, se concluye que este parámetro no es suficiente para equiparar la distinta movilidad de los fragmentos causada por los tamaños presentes. Esto se puede observar numéricamente en las tablas 4-4 y 4-5, donde en la primera no está presente el mecanismo de flujo preferencial y en la segunda sí. Se aprecia que cuando se activa el mecanismo el error disminuye pero queda no obstante 16 kton de error.

#### 4.7.3 Campo lejano

Al igual que en el caso de los trazadores de campo cercano, la figura 4-52 muestra los resultados obtenidos para la simulación de extracción de los trazadores de campo lejano.

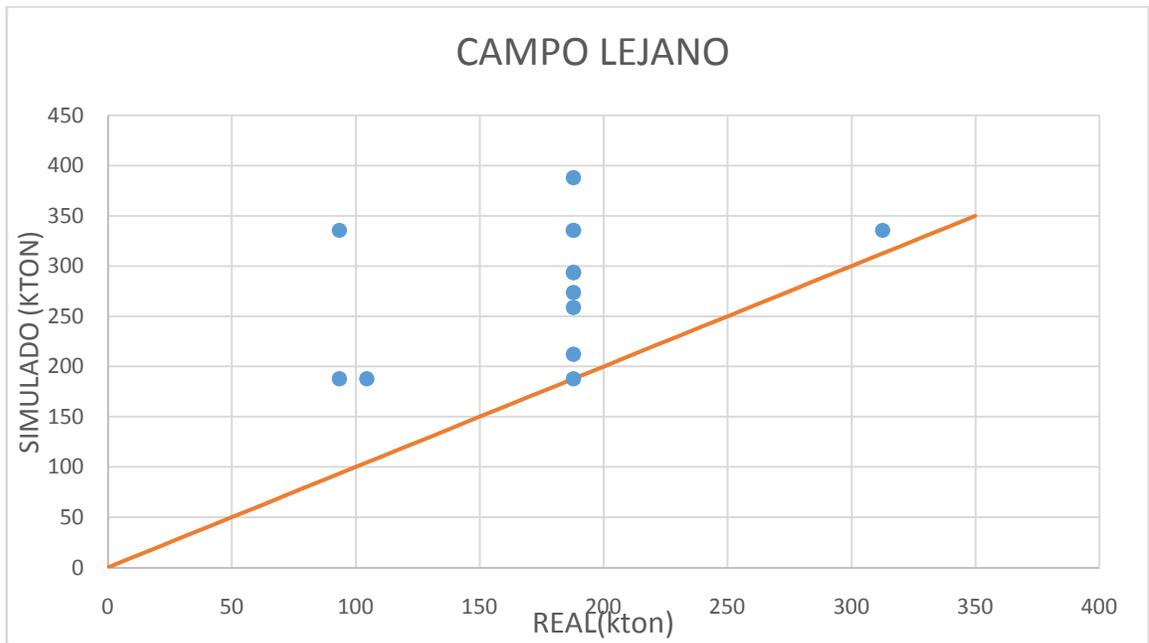


Figura 4-52: resultado predicción tonelaje de salida de trazadores versus datos reales, trazadores de campo lejano.

Los resultados dan cuenta de una sobrestimación del tonelaje de salida para este tipo de trazadores. Sin embargo, el análisis previo, evidencia que la simulación de los trazadores de campo cercano no exhibe una tendencia absoluta sobre la dirección del error, no hay una conclusión categórica sobre si los resultados sobrestimaban o subestimaban el tonelaje de extracción de trazadores. Por esta razón, se concluyó que no había sesgo para esa categoría de trazadores, del tipo campo cercano. En contraste, los trazadores de campo lejano sí ejemplifican una evidente sobrestimación.

En conjunto con la sobrestimación para los trazadores de campo lejano, la figura 4-45 muestra que existe menor movilidad para este tipo de trazadores en comparación a aquellos de campo cercano. Dicha característica causa menor diámetro de la zona de extracción para esta parte de la columna. Es así que el diámetro se reduce de 36 m a 22 m luego de las 50 m de la altura de extracción, ver figura 4-47. El menor diámetro se puede entender por el descenso de la granulometría observada a través del desarrollo de la extracción de estos puntos, la menor granulometría incide en una menor porosidad, lo que se traduce en una contracción del radio de la zona de extracción, característica que el simulador en la actualidad no toma en cuenta.

La observación de contracción de la zona de extracción que define el conjunto total de trazadores, de campo cercano y lejano, no es posible de replicar actualmente por FlowSim. Los parámetros de ajuste del simulador se aplican de forma constante durante la extracción de la columna bajo análisis, no existe actualmente flexibilidad para el cambio de algún parámetro de acuerdo a la altura de columna. La anterior observación muestra la necesidad de mejora en cuanto a los parámetros actuales del programa, de manera que emulen la realidad de los datos en mayor grado.

## **4.8 Conclusiones del capítulo**

### **4.8.1 Datos mina trazadores**

#### **Campo cercano**

El análisis de la prueba industrial de trazadores muestra que existe una estrecha relación entre la carta de extracción, granulometría obtenida y desarrollo de la geometría de extracción. Una buena uniformidad influye en la obtención constante de material de los puntos que componen la batea, lo que supone en general un desarrollo regular de la zona de extracción. Se evidencia entonces que el tiraje tiene un papel preponderante en el desarrollo de la zona de extracción. En el detalle se observan tres consecuencias importantes sobre el flujo de material, si los dos puntos son igual de uniforme, seminuniforme o aislado (60 % del intervalo como aislado), la granulometría juega un rol secundario y se evidencia el desarrollo regular de la zona de extracción. Por otro lado, cuando los puntos presentan un porcentaje de tiraje aislado mayor al 60 % siempre se desarrolla flujo irregular sin importar la granulometría de extracción. Solo cuando el tiraje de los puntos presenta diferencia en valor del índice de uniformidad, la granulometría presenta un papel más significativo.

#### **Campo lejano**

El estudio llevado a cabo sobre los trazadores de campo lejano muestra mayor irregularidad acerca de la extracción. El examen de la carta de extracción de los 3 puntos involucrados presenta dos características principales:

- a través el índice de uniformidad se evidencia el tiraje aislado de los tres puntos bajo análisis, siendo el punto E5930F el que presenta ligeramente un mayor grado de uniformidad 10%, en contraste al 5% y 6% de los puntos E5730F y E5930H respectivamente.
- el punto E5930F presenta mayor extracción en comparación a los otros dos puntos bajo análisis.

En conjunto con lo anterior, se muestra el ingreso temprano de material grueso durante la extracción de los trazadores de campo lejano para los tres puntos de extracción.

De las características anteriores, la mayor extracción de material por el punto E5930F es la que justifica la obtención poco equitativa de los trazadores a través de los puntos bajo análisis, 60% de trazadores son extraídos por el punto E5930F. Importante es el análisis comparativo de las alturas de posicionamiento y extracción de trazadores, ya que mediante este se puede inferir que la geometría de extracción preferencia la evolución en altura.

El análisis conjunto de los trazadores de campo cercano y campo lejano permite inferir que el diámetro de la zona de extracción es inversamente proporcional a la altura. Pasando de los 36 metros para los primeros 50 metros de columna, para luego establecerse en 22 metros. Contracción que se justifica debido al continuo descenso de material con granulometría gruesa.

## 4.8.2 Simulaciones

### Campo cercano

Las simulaciones presentan un grado significativo de error 16 kton, con una desviación estándar de 18,2 kton. Siendo que la extracción mensual promedio por batea es de 5 Kton, el valor de 16 kton indica una diferencia de +/- 3 meses en cuanto a la predicción de la fecha de salida del trazador promedio.

El error encontrado es significativo debido a la exigencia puntual de precisión, error calculado como la diferencia entre el tonelaje de extracción simulado y real de cada uno de los trazadores. Aunque la diferencia es significativa en la comparación puntual, la forma de extracción emulada para cada una de las bateas muestra buena similitud con respecto a los datos recuperados, figura 4-49.

En cuanto al análisis batea a batea, los gráficos de dispersión no muestran una tendencia marcada de sobre o sub estimación. Lo conclusión de los resultados obtenidos evidencia una simulación insesgada pero susceptible de ser mejorada términos de error.

Lo anterior permite concluir que FlowSim simula bien la forma de las geometrías de extracción. Sin embargo, el programa en su versión actual carece de suficiente precisión como para predecir de forma puntual la extracción de trazadores. Las simulaciones se recomiendan deben tener una perspectiva temporal de análisis de 3 meses, dado que el error es de 16 kton y la extracción promedio de los puntos es de 5 kton.

### Campo lejano

Contrario al resultado para los trazadores de campo cercano, los trazadores de campo lejano sí evidencian un sesgo hacia la sobrestimación. Además de sobreestimar el tonelaje de salida de los trazadores, en el largo alcance se obtiene también una menor movilidad de los trazadores, lo que conduce a una contracción del diámetro de la zona de extracción de 36 m a 22 m luego de los 50 m.

Esta contracción del diámetro actualmente no es posible de replicar mediante el simulador, aunque el RMR permite diferenciar la movilidad, se demuestra que este parámetro no es suficiente para equiparar la extracción anticipada de los trazadores de largo alcance. Por otro lado, ya que el set de parámetros Cv y N es uno solo para toda la columna, se tiene un déficit de flexibilidad que presenta una posibilidad de mejora para el programa. La posibilidad de sectorizar Cv o N de acuerdo a la altura de columna, permitirá un menor grado de error y una réplica más realista de la zona de extracción en altura.

## CAPÍTULO 5

### **Recomendación de mejoras para el software FlowSim y análisis conceptual**

El presente capítulo discute la implementación algunos mecanismos de flujo gravitacional que ocurren durante el proceso de extracción. Mecanismos que afectan la forma y velocidad de la evolución de las zonas de extracción. Es importante mencionar que el nivel de implementación se hace desde un punto de vista metodológico, dejando el detalle de codificación en el simulador por definir.

En el capítulo anterior se pone en manifiesto la limitada precisión en la predicción de la evolución de las zonas de extracción, geometrías de extracción estimadas mediante los datos de trazadores para cada zanja en particular. La principal observación fue el cambio del diámetro del elipsoide formado por los trazadores de campo cercano y lejano. Debido a los parámetros actuales del programa, la réplica de la nueva geometría planteada por los datos de los trazadores (figura 4-47) no es posible de llevar a cabo.

El presente capítulo se expone dos metodologías para la mejora de los resultados de la simulación, Cave Back y porosidad en altura. Particularmente el análisis se centra en flexibilizar el parámetro de condición de vacíos,  $C_v$ , dado que este parámetro se puede relacionar directamente con la porosidad del flujo. El sustento de la mejora a través de la porosidad se detalla y explica a través del capítulo.

#### **5.1 Análisis de mecanismos**

La característica principal de FlowSim, es el igual tamaño de las unidades básicas de análisis, células. Sobre las células se actualizan los estados a través de periodos discretos, actualización que permite la simulación del fenómeno de flujo gravitacional. Las células dentro del simulador pretenden representar los fragmentos de material hundido, comprendido esto, la estructura del autómatas celular plantea limitaciones sobre la descripción del material:

Imposibilidad de utilizar una distribución granulométrica a los fragmentos.

Imposibilidad de ajustar una forma de fragmentos.

Imposibilidad de establecer las condiciones de los bordes de partículas.

A pesar de lo anterior, se puede conceptualizar que es posible internalizar la granulometría de forma indirecta. Uno de los efectos principales de la granulometría en el flujo es la porosidad, entonces, al contar con un parámetro que define la condición de vacíos dentro del flujo, queda definido también en parte la granulometría.

A continuación, algunas características del Caving que el simulador puede adoptar:

### **5.1.1 Cave back**

El Cave Back es la interface que se desarrolla como consecuencia del hundimiento de parte del macizo, debido al corte basal realizado de acuerdo a la metodología de extracción block/panel caving.

El cave back define el material que permanece en condiciones insitu del que ha sido perturbado desde su condición original, siendo solo este último el material con capacidad de movimiento, material granular. De esta forma, el material bajo el cave back presenta modificaciones a sus propiedades de roca: granulometría, porosidad, forma, rugosidad, condición de microfracturas y estado tensorial de esfuerzos. La variación de estas propiedades influye en el posterior comportamiento del flujo de material durante el proceso de extracción, es decir, evolución de zonas de extracción/movimiento y perfil de velocidad.

El simulador FlowSim en la actualidad considera que la totalidad del material del modelo de bloques se encuentra fragmentado, obviando el límite de fragmentación en altura que el cave back impone.

En base a lo anterior se hace necesario la introducción del cave back, ya que permitirá restringir los lugares dentro de la columna, desde donde proviene el material para cada uno de los periodos de extracción.

### **5.1.2 Fragmentación secundaria**

La granulometría juega un rol importante dentro del fenómeno de flujo gravitacional, la caracterización de materiales finos, intermedios y gruesos, permite prever las diferencias en la movilidad de las partículas durante el desarrollo del flujo gravitacional. Es sabido que la granulometría obtenida mediante la extracción, es consecuencia de tres etapas de fragmentación secuenciales: in-situ, primaria y secundaria. Es de particular interés la fragmentación secundaria, este tipo de fragmentación varía en intensidad de acuerdo a la altura de extracción (Gomez 2014), característica que consecuentemente tiene efectos en el flujo gravitacional y en la granulometría final obtenida. De esta forma, la fragmentación secundaria se conceptualiza como un fenómeno dependiente de la altura. El efecto principal de la fragmentación secundaria, como última etapa de fragmentación, está en la porosidad que le brinda al material en base a su ubicación en altura.

El parámetro del programa que actualmente define la porosidad es  $C_v$  condición de vacíos. Este parámetro es caracterizado y es el mismo para todas las partículas dentro del flujo. Como se menciona, el proceso de fragmentación secundaria es de carácter espacial, siendo de la misma forma su consecuencia más directa, la porosidad. La porosidad resulta entonces una característica dependiente de la altura de columna; conclusión que es contraria a lo planteado en la actual versión del simulador FlowSim.

### **5.1.3 Interlocking**

El fenómeno de interlocking es el nombre dado a la capacidad del material fragmentado de agruparse para generar partículas con formas más complejas. Estudios recientes han revelado la importancia de este fenómeno en el flujo de material (William Hancock & Dion Weatherley & Gideon Chitombo (2010), Luc Scholtes & Frédéric-Victor Donze (2012)). El grado de

agrupamiento depende en gran medida de características geológicas; persistencia de discontinuidades y microfracturas. El fenómeno de interlocking condiciona la movilidad del flujo, ya que genera conglomerados de partículas que limitan la difusión de vacíos. Al igual que en el caso de materiales gruesos, el fenómeno propicia la creación de colgaduras, condicionando también de esta forma el desarrollo regular del flujo de material.

La consecuencia más significativa del fenómeno de interlocking está en la porosidad. La creación de conglomerados temporales de partículas genera un mayor grado de porosidad, aspecto que debe tenerse en cuenta dentro de la modelación del flujo gravitacional de mineral.

#### **5.1.4 Análisis conjunto de los mecanismos**

El análisis de los tres fenómenos mencionados que se desarrollan a través del proceso de caving, tienen en particular un común efecto sobre el flujo gravitacional del material, porosidad variable.

#### **Porosidad como resultado del cave back**

El cave back diferencia dos zonas dentro de la columna de extracción, una sin porosidad (material insitu) y otra con una porosidad tal que permite su movilización.

#### **Porosidad como resultado de la granulometría**

La granulometría obtenida en los puntos de extracción varía de acuerdo a la altura de columna desde donde provienen, debido al proceso de fragmentación secundaria. La fragmentación secundaria es un fenómeno que varía en intensidad de acuerdo a la altura de columna en donde se requiera calcular su efecto. Es sabido que mientras más alto se encuentre el material sobre la columna, mayor será el efecto de la fragmentación secundaria y por lo tanto mayor también el efecto de reducción de su granulometría. Se puede deducir entonces que, al reducirse la granulometría de acuerdo a la altura, la porosidad también lo hará. En efecto, de los resultados obtenidos de la extracción de los trazadores de campo lejano, se observó que existe una reducción del diámetro de la zona de extracción, lo que se condice con una menor porosidad (menos vacíos) que permiten una mayor rapidez en la evolución de la altura de extracción.

#### **Porosidad como resultado de interlocking**

La porosidad como resultado de este fenómeno es más bien de carácter general sobre el flujo, no siendo intensificado de acuerdo a dirección o ubicación dentro de la columna de extracción. Este fenómeno al igual que el efecto de la forma de las partículas de material y el efecto del ángulo de fricción, inciden de modo sobre todas las partículas del flujo, no diferenciando por ubicación. Razón por la cual se estima actualmente incluida y modelada indirectamente dentro de los parámetros actuales del programa. De esta forma no se hace necesario la creación de una metodología de implementación de este fenómeno.

En definitiva, los mecanismos antes mencionados demostraron tener significativa influencia sobre la porosidad del material fragmentado, cada una en distinto alcance e intensidad.

La implementación directa de características como distribución granulométrica e interlocking no es posible dentro de FlowSim, ya que, una de las características de los autómatas celulares es precisamente que todas las células (unidad básica) tienen igual dimensión. Sin embargo, aunque la causa no pueda ser implementada, el efecto que estas tienen sobre el flujo sí, es decir, se puede elaborar un algoritmo que tome en cuenta su influencia sobre la porosidad.

## 5.2 Implementación de mejoras.

### 5.2.1 Implementación de porosidad en altura

El algoritmo que modela la variación de la porosidad en altura debe tomar en cuenta la definición de dominios regulares a largo de la altura de columna. A priori no se cuenta con información en la literatura sobre una caracterización exacta de la forma de las zonas de extracción y movimiento para diferentes tipos de materiales. Dado esto, lo acertado de llevar a cabo es calibrar el simulador a las condiciones particulares del flujo en análisis, es decir, teniendo información sobre la evolución de las zonas de extracción en terreno se podrá ajustar la variación del parámetro  $C_v$  y definir los intervalos de altura adecuados.

La figura 5-1 es el diagrama del algoritmo propuesto.

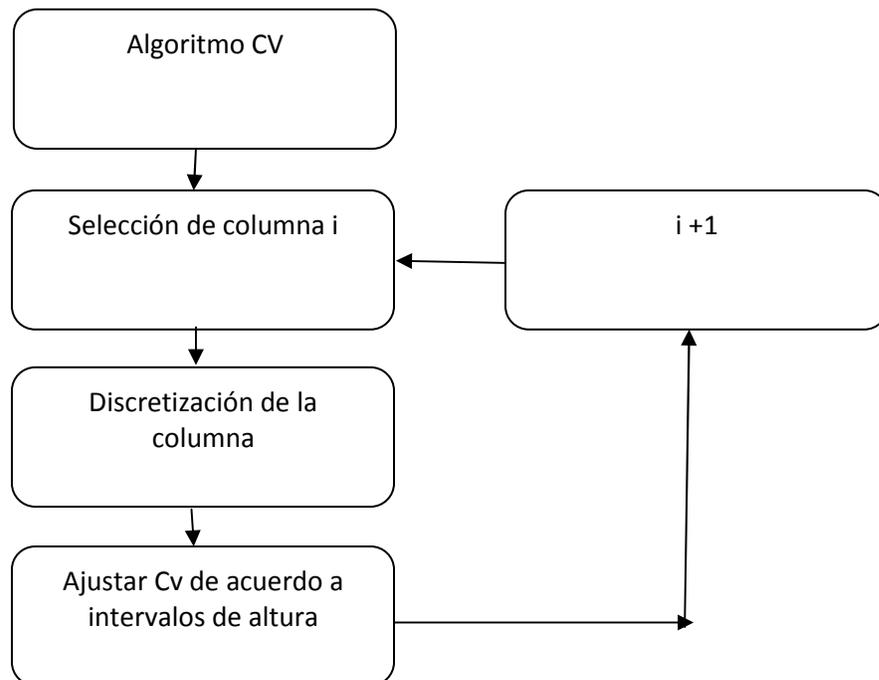


Figura 5-1: Diagrama de flujo algoritmo de asignación de  $C_v$  en altura.

### 5.2.2 Implementación cave back

La implementación del cave back se puede realizar de dos formas:

Con información de la superficie de cave back, al tener las superficies de evolución del cave back en altura, se procede a introducir estas superficies dentro del simulador. De esta forma se interviene en la asignación interna que el simulador hace sobre los estados de los bloques. Así, se condiciona el estado granular solo a los bloques que se encuentren bajo la superficie del cave back para el periodo en análisis.

Con predicción empírica de cave back, este tipo de introducción del cave back es de carácter empírico, ya que se basa en experiencia adquirida al interior de la división El Teniente, de propiedad de la empresa Codelco. Según profesionales de esta faena, la extensión en altura del cave back para un periodo dado es proporcional a 3 veces la altura de extracción del periodo anterior. Por lo tanto, la altura del cave back será función de la altura de extracción previa, altura que puede calcularse en base a la extracción respectiva y las dimensiones de la malla utilizada.

La figura 5-2 es el diagrama del algoritmo propuesto.

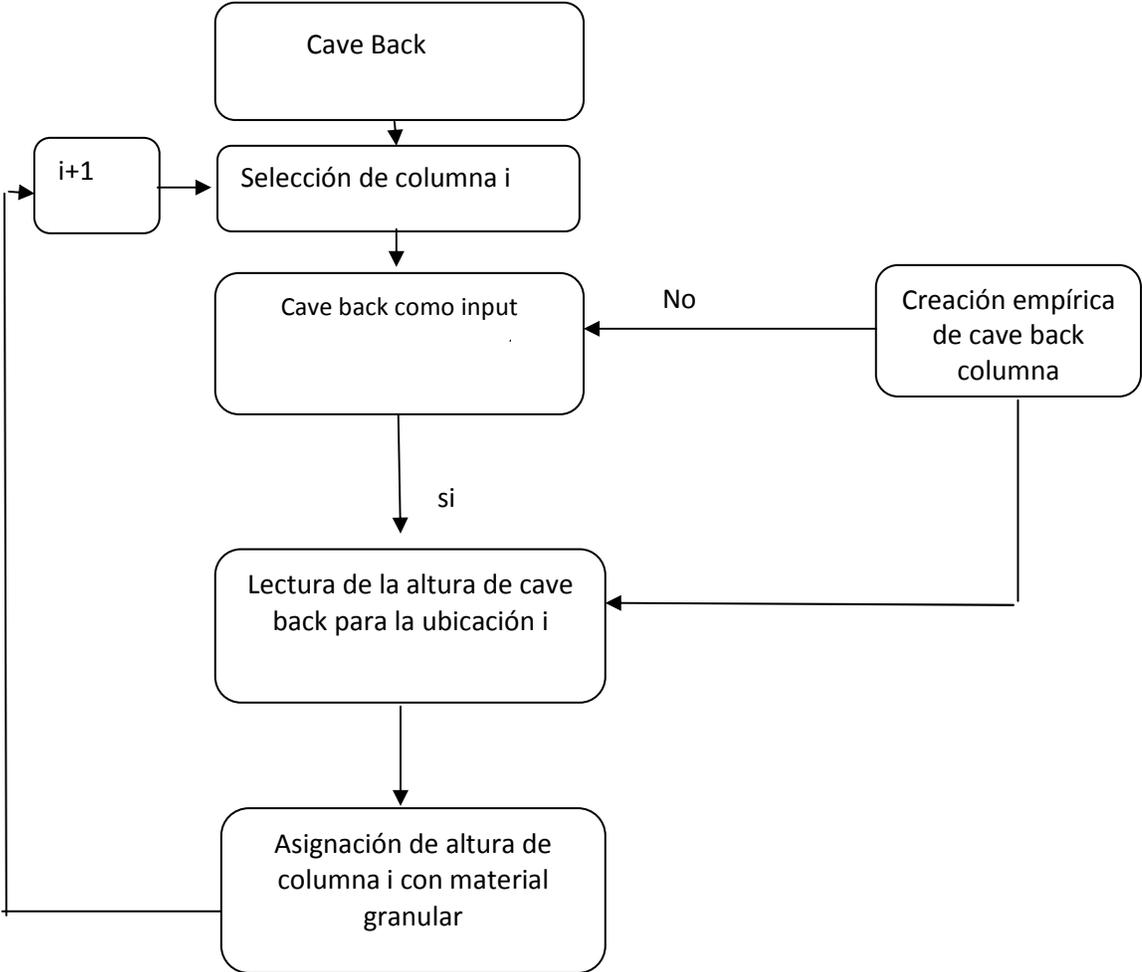


Figura 5-2: Diagrama de flujo algoritmo de cave back.

### 5.3 Conclusiones

FlowSim cuenta entre sus parámetros a la denominada condición de vacíos,  $C_v$ , este parámetro restringe la difusión de vacíos al cumplimiento de un valor mínimo dentro de una vecindad. Al definir el número de vacíos dentro de una vecindad, define también el valor de la porosidad del flujo, dado que la porosidad determina la evolución de la altura y el diámetro de la zona de flujo a través de la extracción, determina entonces también la zona de movimiento/extracción. Sin embargo, es sabido que la porosidad varía en altura debido al progresivo ascenso del cave back, fragmentación secundaria y otras características geológicas estructurales. Variación que el simulador en la actualidad no toma en cuenta, ya que el parámetro  $C_v$  es único para toda la columna de extracción

La implementación del cave back y variación de porosidad en altura, permitirán predecir con mayor exactitud la geometría real de la zona de extracción. Estas nuevas herramientas del programa, permitirán dotar al simulador de mayor flexibilidad en cuanto a la calibración de la geometría de la zona de extracción real obtenida.

# CAPÍTULO 6

## Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de la investigación se basa en primera instancia en el análisis de las zonas de extracción interpoladas a partir del dato de trazadores ubicados en terreno. El estudio de la evolución de las zonas de extracción desde la perspectiva de la extracción y granulometría, permite establecer que la uniformidad tiene un rol preponderante sobre el desarrollo de estas zonas. El análisis de los trazadores de campo cercano muestra que la uniformidad tiene gran influencia sobre el desarrollo de la zona de extracción. Se destacan 3 comportamientos del flujo respecto del valor de la uniformidad de los puntos que componen las bateas:

Para bateas con similar valor del índice de uniformidad vectorizado: uniforme, semiuniforme o aislado (hasta el 60% del intervalo aislado), la granulometría juega un rol secundario y se evidencia el desarrollo regular de la zona de extracción. Por otro lado, cuando los puntos presentan un porcentaje de tiraje aislado mayor al 60 % siempre se desarrolla flujo irregular sin importar la granulometría de extracción. Solo cuando el tiraje de los puntos presenta diferencia en el valor y tipo del índice de uniformidad vectorizado, la granulometría presenta un papel más significativo.

Similar metodología se llevó a cabo para el análisis de los trazadores de campo lejano. El examen de estos trazadores evidenció de igual forma que la extracción tiene mayor predominancia en cuanto a la evolución de las zonas de extracción, siendo el punto de mayor salida de trazadores aquel que exhibió mayor extracción y uniformidad.

Al graficar la altura de extracción versus la altura de posicionamiento de cada trazador obtenido, campo cercano y campo lejano, se infiere una contracción de la zona de extracción luego de los 50 metros de la altura de columna. Hallazgo que difiere del desarrollo ideal de elipses predichas en la literatura.

Posteriormente, la investigación prosiguió con el análisis del simulador. La calibración de los trazadores se logró mediante la variación de los parámetros  $C_v$ ,  $N$  y  $M$ . La calibración en base a la similitud de la geometría de las zonas de extracción para los trazadores de campo cercano es buena, sin embargo, el error de predicción puntual trazador a trazador fue de alrededor de 16 kton. El análisis de las simulaciones no evidencia una dirección preferente de error (sesgo) para el conjunto de trazadores de campo cercano, sin embargo, las simulaciones de campo lejano sí evidencian una tendencia de sobreestimación.

Dado que la calibración se realizó tomando en cuenta la totalidad de parámetros del programa, se considera que el simulador en sus condiciones actuales no permite la réplica de la zona de extracción descrita por la totalidad de los trazadores. Se observa que para los trazadores de campo lejano, la zona de extracción experimenta una contracción que el programa no puede reproducir.

El capítulo 5 propone la mejora en predicción de las simulaciones a través de dos modificaciones:

- La flexibilización del parámetro  $C_v$ , este parámetro permite incorporar la porosidad desigual dentro de la columna de mineral, producto de la fragmentación secundaria.

- La incorporación del cave back, la creación de esta interface permite definir dos zonas dentro del modelo de bloques, una sin perturbación y la otra con material fragmentado, material granular.

### **Enfoque a futuro**

El análisis llevado a cabo sobre la evolución de las zonas de extracción tomó en cuenta dos parámetros, carta de extracción y granulometría obtenida, estos parámetros mostraron ser significantes al momento de analizar las geometrías de las zonas de extracción. Sin embargo, diversos autores (Jaeger (1996); Pierce (2008); Yenge (1981)) plantean que características como, condición de esfuerzos, forma de partículas y condiciones de las superficies de las partículas condicionan el flujo gravitacional. De los ítems antes mencionados, la condición de esfuerzos pareciera tener mayor influencia. Fenómenos como colgaduras, stress arching y perfil de velocidad se teorizan dependientes de la condición de esfuerzos (Pierce 2008); resulta entonces atractivo el estudio del desarrollo del flujo gravitacional a través de lecturas de esfuerzos de tal forma de dilucidar su real impacto.

Los datos de campo cercano obtenidos a la fecha son cerca del 65 % del total de trazadores posicionados en este rango, razón que permite confiar en la representatividad que estos brindan. Por otro lado, los trazadores de campo lejano obtenidos son solo una fracción pequeña del total de este tipo de trazadores, 8%. Por esta razón, las tendencias inferidas a partir de estos deben de ser validadas con una mayor proporción de estos, lo que se podrá lograr en un futuro cercano.

## Bibliografía

- Brown, E.T. (2002). *Block Caving geomechanics*. 1[st] Edition. pp. 346-374.
- Brunton, I., Sharrock, G., Lett, J. (2012). *Full Scale Near Field Flow Behaviour at the Ridgeway Deeps Block Cave Mine*. Proceedings of MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Westmount, Canada.
- Bustamante, M. (2015). *Calibración y desarrollo de FlowSim mediante la utilización de trazadores inteligentes*. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Castro, R. (2006). *Study of the mechanism of gravity flow for block caving*. Ph. D. thesis, University of Queensland, Australia.
- Castro, R. y W. Whiten (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., F. González, y E. Arancibia (2009, July). *Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 109, 1–8.
- Castro, R. y E. Rubio (2009). *Efectos de los mecanismos de dilución en la estimación de reservas de la mina chuquicamata subterránea*. Estudio complementario, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Castro R., Vargas R., de la Huerta F. (2012). *Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at the El Teniente Mine*.
- Cumming-Potvin, D., Wesseloo, J., Jacobsz, S., Kearsley, E. (2016). *Results from Physical Models of Block Caving*. Proceedings of MassMin 2016, Sydney, Australia.
- Fuenzalida, M. (2012). *Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería del caving*. Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Universidad de Chile, Departamento de ingeniería de Minas.
- Garces, D. (2015). *Estudio de flujo gravitacional de material hundido por medio de trazadores inteligentes*. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- González, F. (2008). *Metodología para diseño de mallas de extracción incorporando autómatas celulares*. Memoria para optar al título de ingeniera civil de minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Gómez, R. (2014). *Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving*. Memoria para optar título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- González, R. (2014). *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. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

- Hancock, W., Weatherley, D., Chitombo, G. (2010). *Modeling the Gravity Flow of rock using the Discrete Element Method*. Proceedings of MassMin 2012, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Westmount, Canada.
- Halim, A. (2010). *3D Large Scale Physical Modelling for Studying Interactive Drawing and Drawpoint Spacing in Block Caving Mines*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- 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, Part I y II*. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 2, pp 35-41.
- Kvapil, R. (1992). *Sublevel caving. SME mining engineering handbook, 2° edición*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Colorado, USA.
- Laubscher, D. (1994). *Cave Mining – the state of the art*. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 94, pp 279-293.
- Laubscher, D. (2000). *Block caving manual*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- Marano, G. (1980). *The interaction between adjacent draw points in free flowing materials and its application to mining*. Chamber of Mines Journal. pp 25-32.
- 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.
- Peters, D. (1984). *Physical Modeling of the Draw Behavior of Broken Rock in Caving*. Quarterly of the Colorado School of Mines, Colorado, USA. pp 1-48.
- Pierce, M. (2008, Diciembre). *REBOP Version 3.1 For Block Caving User Guide*. Itasca Consulting Group, Inc.
- Pierce, M. (2009). *A Model for Gravity Flow of fragmented Rock in Block Caving Mines*. Ph.D. thesis, University of Queensland, Australia.
- Power, G. (2004). *Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modeling and full scale experiments*. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.
- Power, G., Campbell, A. (2016). *Modelling of Real-time Marker data to Improve Operational Recovery in Sublevel Caving Mines*. Proceedings of MassMin 2016, Sydney, Australia.
- Rustan, A. (2000). *Gravity Flow of Broken Rock-What is Known and Unknown*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of MassMin 2000, Australia.
- Susaeta, A. (2004). *Theory of gravity flow (part 1 y 2)*. Proceedings of MassMin 2004, Santiago, Chile.

Trueman, R., Castro, R., Halim, A. (2008). *Study of Multiple Draw-Zone Interaction in Block Caving Mines by means of a large 3D Physical Model*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 45, pp 1044-1051.

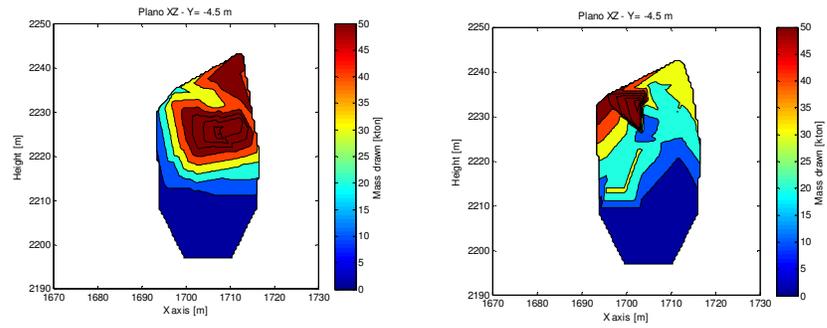
Valencia, M. (2014). *Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en Minería de block/panel caving*. Memoria para optar al título de ingeniera civil de minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

Vargas, R., Castro, R., De la Huerta, F. (2012). *Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at the el Teniente Mine*. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 112. pp 871-876.

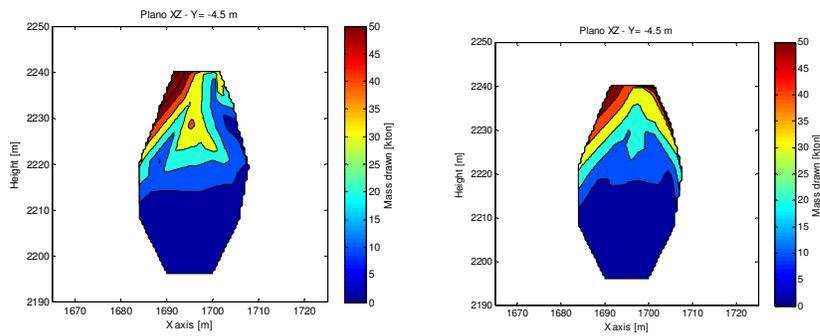
Viera, E., Montecion, M., Meléndez, M. (2014). *First steps in monitoring gravity Flow in el Teniente mine: Installation stage in Block-2, Esmeralda mine*. Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Yenge, L. (1981). *Analysis of Bulk Flow of Material Under Gravity Caving Process Part II*. Colorado School of mines, Colorado USA.

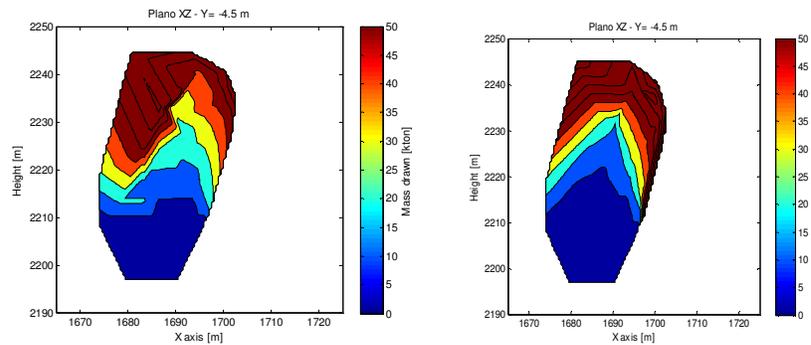
# Anexo A



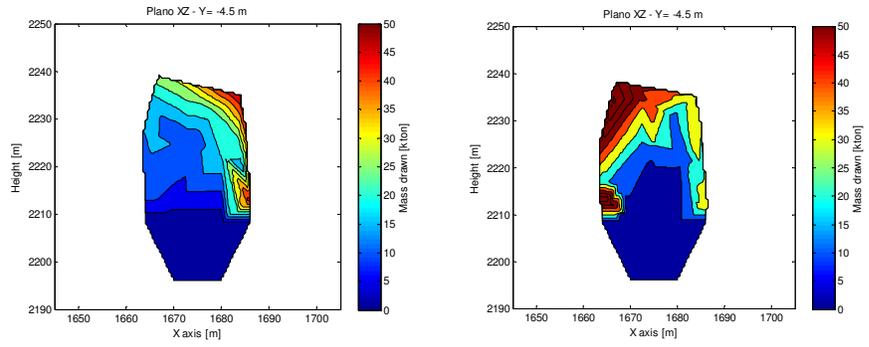
Anexo A 1: Vista longitudinal zanja 30, zonas de extracción Real (izquierda) y simulada (derecha)



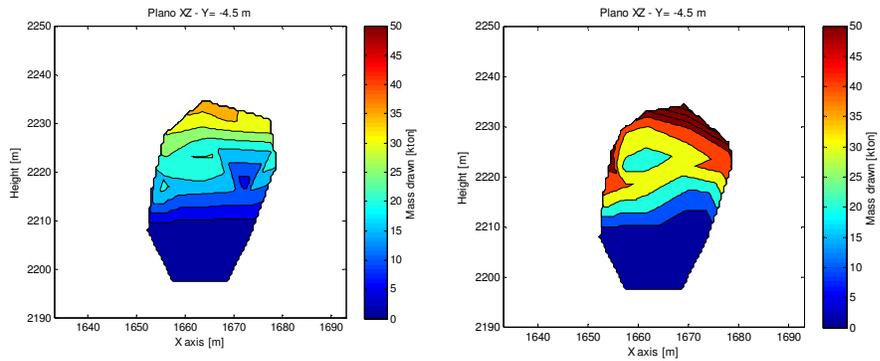
Anexo A 2: Vista longitudinal zanja 31, zonas de extracción Real (izquierda) y simulada (derecha)



Anexo A 3: Vista longitudinal zanja 32, zonas de extracción Real (izquierda) y simulada (derecha)



Anexo A 4: Vista longitudinal zanja 33, zonas de extracción Real (izquierda) y simulada (derecha)



Anexo A 4: Vista longitudinal zanja 34, zonas de extracción Real (izquierda) y simulada (derecha)

## Anexo B

### TRAZADORES RECUPERADOS EN EL CAMPO CERCANO

ID Marcador	Punto de salida	Posicionamiento			Tonelaje de extracción (Kton)
	DPE	X (m)	Y (m)	Z (m)	
225782	59 30H	1706,99	70,84	2225,79	96,71
224682	59 30H	1713,54	67,06	2219,24	32,93
225310	59 30H	1706,99	70,84	2235,79	39,66
224544	59 30H	1709,36	69,47	2231,60	38,36
226403	59 30H	1713,06	67,34	2244,60	55,69
225117	59 30H	1714,11	66,73	2239,75	53,39
224513	59 30H	1715,17	66,12	2234,90	63,11
225361	57 30F	1716,22	65,51	2230,05	58,45
225103	57 30F	1717,28	64,90	2225,20	47,72
225478	59 30H	1719,98	63,34	2239,60	38,04
224816	57 30F	1708,538	58,401	2219,241	36,43
225129	57 30F	1704,359	60,814	2231,602	30,59
226305	59 30H	1706,724	59,448	2227,414	43,42
225771	59 30H	1709,09	58,083	2223,226	83,00
226140	59 30H	1708,056	58,68	2244,6	94,99
224887	59 30H	1709,112	58,07	2239,751	90,44
226129	59 30H	1710,168	57,46	2234,902	87,16
225788	59 30H	1711,224	56,851	2230,053	86,61
224888	59 30H	1712,28	56,241	2225,204	109,79
225884	59 30H	1714,984	54,68	2244,6	71,45
226411	59 30H	1714,984	54,68	2234,6	43,78
226147	57 30F	1714,984	54,68	2229,6	87,57
225793	59 30H	1714,984	54,68	2224,6	85,06
225979	59 30F	1709,984	46,02	2244,6	119,19
226400	57 30F	1688,561	68,753	2239,6	107,81
225866	57 30F	1688,561	68,753	2234,6	50,42
226113	57 30F	1688,561	68,753	2229,6	23,64
224832	57 30F	1692,762	66,327	2234,834	18,40
224977	57 30F	1691,831	66,864	2229,951	25,38
225544	57 30F	1701,551	61,253	2240,79	76,23
226224	57 30F	1697,462	63,614	2231,975	23,05
224841	59 30H	1701,551	61,253	2230,79	27,16
225239	57 30F	1698,779	62,853	2226,949	26,08
226359	57 30F	1696,007	64,453	2223,108	22,26
224722	59 30H	1701,551	61,253	2220,79	19,58

224684	59 30H	1697,731	63,458	2218,437	21,01
225302	57 30F	1683,561	60,092	2239,6	40,19
224690	59 31H	1696,993	53,52	2225,79	26,81
225270	57 31F	1700,266	51,63	2222,515	31,02
225828	57 31F	1703,538	49,741	2219,241	14,52
224808	59 31H	1701,724	50,788	2227,414	16,10
225256	59 31H	1704,09	49,423	2223,226	21,53
224978	59 31H	1704,112	49,41	2239,751	33,19
224706	59 31H	1705,168	48,8	2234,902	0,04
225623	59 31H	1706,224	48,19	2230,053	26,81
225802	57 31F	1707,28	47,581	2225,204	10,65
224916	57 31F	1709,984	46,02	2229,6	11,45
225154	57 32F o 57 31F	1691,993	44,859	2225,79	12,97
224878	57 31F	1695,266	42,97	2222,515	41,67
225098	57 31F	1691,993	44,859	2235,79	41,51
225150	57 31F	1694,359	43,494	2231,602	40,19
226155	59 31H	1700,168	40,14	2234,902	63,31
225865	59 31H	1701,224	39,53	2230,053	70,70
226047	57 31F	1695,417	64,794	2227,568	26,89
225664	59 31H	1683,561	60,092	2244,6	95,32
225559	59 31H	1696,551	52,592	2240,79	29,22
225647	57 31F	1692,462	54,953	2231,975	15,95
225551	57 31F	1690,417	56,134	2227,568	32,84
224736	59 31H	1696,551	52,592	2230,79	26,81
225910	57 31F	1693,779	54,193	2226,949	36,56
224820	57 31F	1691,007	55,793	2223,108	23,93
225363	57 31 F	1696,551	52,592	2220,79	20,57
225250	57 31F	1692,731	54,798	2218,437	16,36
225603	59 32H	1698,056	41,359	2244,6	67,39
226412	59 32H	1699,112	40,75	2239,751	69,34
225135	59 32F	1704,984	37,359	2244,6	81,00
225711	59 32F	1704,984	37,359	2239,6	70,90
226257	59 32F	1704,984	37,359	2229,6	70,90
226197	59 32F	1704,984	37,359	2224,6	89,50
225783	59 32F	1704,984	37,359	2219,6	89,50
225519	59 32H	1686,993	36,199	2225,79	14,74
225887	59 32H	1690,266	34,31	2222,515	19,43
225715	59 32H	1693,538	32,421	2219,241	17,92
224525	59 32H	1696,81	30,531	2215,966	31,46
226255	59 32H	1689,359	34,833	2231,602	29,15
226231	59 32H	1691,724	33,468	2227,414	22,99

226185	59 32H	1694,09	32,102	2223,226	24,24
225498	59 32H	1696,455	30,736	2219,038	34,72
225899	59 32H	1699,984	28,699	2229,6	90,87
225819	59 32H	1698,82	29,371	2214,85	46,41
225809	59 32H	1694,112	32,089	2239,751	44,88
225723	59 32H	1695,168	31,48	2234,902	40,99
225803	59 32H	1696,224	30,87	2230,053	44,21
226405	57 32F	1697,28	30,26	2225,204	39,90
225316	59 32H	1698,336	29,65	2220,355	44,21
224709	59 32H	1699,984	28,699	2239,6	75,26
225627	59 32H	1699,984	28,699	2224,6	80,23
224748	5732F	1681,993	27,539	2225,79	24,74
225401	57 32F	1681,993	27,539	2235,79	26,00
225815	57 32F	1684,359	26,173	2231,602	34,58
226077	59 32H	1686,724	24,807	2227,414	77,01
225530	59 32H	1688,056	24,039	2244,6	65,20
225040	59 32H	1689,112	23,429	2239,751	74,44
224944	59 32H	1694,984	20,039	2229,6	55,74
226101	57 32F	1673,561	42,772	2244,6	92,09
224742	59 32H	1686,551	35,272	2230,79	84,29
224555	57 32F	1686,551	35,272	2220,79	21,11
225735	59 32H	1682,731	37,478	2218,437	41,18
226070	57 32F	1674,623	30,612	2244,6	23,70
226329	57 33F	1676,993	18,879	2225,79	12,03
225561	59 33H	1680,266	16,989	2222,515	20,37
224976	59 33H	1676,993	18,879	2235,79	29,59
224778	59 33H	1679,359	17,513	2231,602	23,98
224700	57 33F	1686,81	13,211	2215,966	77,64
225018	59 33H	1684,09	14,781	2223,226	24,37
225345	59 33H	1685,168	14,159	2234,902	61,47
226344	57 32F o 57 33F	1679,623	39,272	2244,6	25,29
224697	57 33F	1683,779	36,872	2226,949	64,13
225102	57 33F	1673,693	31,149	2239,717	22,84
225115	57 33F	1681,551	26,612	2240,79	11,78
225950	57 34F	1666,007	12,492	2223,108	13,18
226279	57 33F	1679,507	27,792	2236,383	10,81
225946	57 33F	1677,462	28,973	2231,975	10,81
225454	57 33 F	1663,693	13,828	2239,717	30,47
225424	57 33F	1662,762	14,366	2234,834	20,04
225513	57 33F	1661,831	14,903	2229,951	18,72
225304	57 33F	1667,462	11,652	2231,975	20,67

225911	57 33F	1665,417	12,833	2227,568	13,48
224592	57 33F	1663,372	14,013	2223,16	17,66
225341	57 33F	1668,779	10,892	2226,949	13,18
225308	57 33F	1663,235	14,092	2219,267	40,16
225049	57 33F	1671,551	9,291	2220,79	18,21
225053	57 33F	1667,731	11,497	2218,437	15,49
225743	57 33F	1663,906	13,705	2216,092	15,79
225790	59 33H	1653,561	8,131	2224,6	17,06
225318	57 34F	1653,906	-3,616	2216,092	22,21
225741	57 34F	1657,731	-5,824	2218,437	21,14
224628	57 34F	1673,538	-2,22	2219,241	20,74
226103	57 34F	1653,235	-3,228	2219,267	17,93
226393	57 34F	1656,007	-4,829	2223,108	25,30
224486	57 34F	1658,779	-6,429	2226,949	29,54
226298	57 34F	1655,417	-4,488	2227,568	30,25
226214	57 34F	1651,831	-2,418	2229,951	41,47
226122	57 34F	1657,462	-5,668	2231,975	39,42
226416	59 34H	1674,09	-2,539	2223,226	11,50
224683	59 34H	1679,984	-5,942	2224,6	25,30
225629	59 34H	1676,224	-3,771	2230,053	33,74
225475	59 34H	1674,112	-2,552	2239,751	38,87

# Anexo C

## Código de interpolación mediante Matlab

```
function F=funcion_IEZ(A)
% Inicialización de datos (A=matriz con cordenasas y masa extraida)
x=A(:,1);
y=A(:,2);
z=A(:,3);
ton=A(:,4);
% Fin Inicialización de datos

% Interpolación de la masa extrida con los marcadores recuperados
F = scatteredInterpolant(x,y,z,ton,'linear','none'); %Función de interpolación
tix=1670:0.1:1730;
tiy=40:0.1:90;
tiz=2210:0.1:2250;
[xq,zq] = meshgrid(tix,tiz); %malla para evaluar la función de interpolación F
[yq,zq1] = meshgrid(tiy,tiz); %malla para evaluar la función de interpolación F

% Función evaluada en un plano vertical XZ
vq_xz_2= F(xq,ones(size(xq,1),size(xq,2))*67.75,zq);
% Función evaluada en un plano vertical YZ
vq_yz = F(ones(size(yq,1),size(yq,2))*1705.18,yq,zq1);

% Fin Interpolación de la masa extrida segun los marcadores recuperados

% Interpolación 3D
X=linspace(min(x),max(x),30);
Y=linspace(min(y),max(y),30);
Z=linspace(min(z),max(z),30);
x2=[]; %Variable X donde se guarda el valor de los query points
y2=[]; %Variable Y donde se guarda el valor de los query points
z2=[]; %Variable Z donde se guarda el valor de los query points
v2=[]; %Variable Ton donde se guarda el valor de los query points

for i=1:length(X) %Código que interpola cada query point
    for j=1:length(Y)
        for k=1:length(Z)
            x2=[x2;X(i)];
            y2=[y2;Y(j)];
            z2=[z2;Z(k)];
            v2=[v2;F(X(i),Y(j),Z(k))];
        end
    end
end
end

% Graficos 2D
figure(1) %Sección XZ
contourf(xq,zq,vq_xz_2) %función filled contour, crea isolíneas en grafico 2D
caxis([0 max(ton)]); %Rango de valores del colormap
xlabel('X axis [m]')
ylabel('Height [m]')
axis('equal')
axis([1670 1728 2210 2250])
m=colorbar();
ylabel(m,'Mass drawn [kton]')
title('Plano XZ - Y=67.75 m');

figure(2)%Sección YZ
contourf(yq,zq1,vq_yz)
caxis([0 max(ton)]);
xlabel('Y axis [m]')
ylabel('Height [m]')
axis('equal')
axis([40 90 2210 2250])
m=colorbar();
ylabel(m,'Mass drawn [kton]')
title('Plano YZ - X=1705.18 m');
% Fin graficos 2D
```