



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

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA PLANIFICACIÓN DE LARGO  
PLAZO EN BLOCK/PANEL CAVING**

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

**JORGE ANDRÉS CALDERÓN BECERRA**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
FRANCISCO WALTHER SALAMANCA  
JAIME CHACÓN FERNÁNDEZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
MARZO 2011**

## RESUMEN

Las metodologías actuales para la estimación de reservas en Block o Panel Caving se basan en principios de mezcla propuestos hace más de 25 años, cuando se intentó representar la física del flujo gravitacional mediante un modelo volumétrico de mezcla vertical que simula la mezcla entregando leyes diluidas por altura. De esta problemática, se han generado mediante las últimas investigaciones sobre el tema (International Caving Study), modelos de flujo gravitacional basados en balances de masa (REBOP) y en criterios mecánicos del caving, que permiten modelar de forma más acertada el fenómeno incluyendo mezcla horizontal y vertical.

En este trabajo de título se propone una metodología para la estimación de reservas de Block/Panel Caving en la cual se utilice REBOP en el modelamiento del flujo gravitacional. De esta forma, se realiza un estudio para cuantificar las reservas extraíbles en función de las distintas secuencias de extracción, y comparar los resultados con la metodología tradicional que utiliza sólo mezcla vertical. Para ello se utilizó una herramienta de planificación (MSBPC) y se determinaron recomendaciones para su implementación.

Se realizaron tres casos, considerando la ubicación de la dilución, el primero sólo en la vertical, el segundo en la horizontal y el tercero considerando ambas componentes utilizando distintos tipos de secuencia. En el caso donde el diluyente se encuentra en altura, el modelo de Laubscher tiende a sobreestimar el valor de la ley entre un 2.7% a un 8.3% dependiendo de la secuencia de extracción, donde generalmente las menores diferencias se encuentran para secuencias tipo panel caving. Del segundo caso se concluye que la incidencia de la dilución lateral afecta prácticamente en su totalidad solo a los puntos externos. Para los puntos externos, la dilución lateral comprende entre un 32% a un 37% del material de las columnas. El tercer caso muestra una diferencia significativa en la estimación de leyes. El modelo de mezcla vertical sobreestima las leyes y los finos entre un 12% y un 17% con respecto al flujo gravitacional, dependiendo de la secuencia de extracción. En general, las secuencias tipo block caving son las que tienen la menor correlación con el modelo de mezcla vertical, por lo que se obtiene para estos casos, reservas con una ley más baja y menor cantidad de finos.

Luego de generar los modelos diluidos en función de las distintas secuencias de extracción, la metodología plantea volver a estimar la envolvente económica. Los resultados obtenidos muestran una mejoría en el Van operacional de un 3,6% y 12,5% para Panel Caving y Block Caving respectivamente.

Estos resultados reflejan la necesidad de introducir un modelo de flujo gravitacional en el proceso de estimación de reservas. Si bien, los resultados obtenidos muestran diferencias entre el block y el panel caving, no se intenta determinar cuál es el mejor método, sino demostrar la utilidad de la metodología. Al utilizar el flujo gravitacional dentro del procedimiento, se establecen diferencias claras a lo utilizado usualmente, ya que considera la dilución horizontal en el modelo de mezcla disminuyendo la ley media y los finos totales.

## ABSTRACT

Current methodologies for the reserves estimation in Block and Panel Caving are based on principles proposed 25 years ago, which attempted to represent the physics of gravity flow through a volumetric model of vertical mixing which simulates the mixing resulting diluted grades by height. From this problem, new models has been generated through new researches on this topic (International Caving Study) models based on gravity flow and mass balances of caving mechanics (REBOP) criteria have been generated to allow more accurate modeling of the phenomenon by recent research on the subject.

In this work, a new methodology is proposed for Block / Panel Caving reserve estimation. This methodology uses REBOP in the modeling of gravity flow. According to this, the extractable reserves were determined considering the different draw sequences. In addition to, the results were compared using the traditional methodology which is based only on vertical mixing, using a planning tool (MSBPC).

Three studies were conducted to quantify the differences caused by the types of draw sequence; the first one with the aim of studying the vertical dilution, the second one studies horizontal dilution and the third one involves both, the vertical and the horizontal dilution. In the case of vertical dilution, Laubscher's model tends to overestimate the value of grade between 2.7% to 8.3% depending on the extraction sequence, which generally are minor differences for panel caving sequences. From the second case it is concluded that the incidence of horizontal dilution affects practically all external drawpoints. For external drawpoints, the horizontal dilution comprises from 32% to 37% of the draw columns. The third case shows a significant difference in the grade estimation. The vertical mixing model overestimates the grades and metal grades between 12% and 17% compared to gravity flow model, depending on the draw sequence.

In general, block caving sequences are those with the lowest correlation with the vertical mixing model, thus, the extracted reserves showed a lower grade and a lower amount of metal grade.

After generating the diluted models based on different sequences of extraction, the methodology proposes to re-estimate the economic envelope. The results show an improvement of 3.6% and 12.5% for Panel Caving and Block Caving respectively.

These results reflect the need to introduce a gravity flow model in the process of estimating reserves. While the results show differences between the block and panel caving is not intended to determine the best method, but to demonstrate the usefulness of the methodology. By using gravity flow into the process, establishing clear differences as usually used, since it considers the horizontal dilution in the mixture model by decreasing the average grade and the total fine.

## AGRADECIMIENTOS

Sin duda que escribir esta sección representa el fin de una gran etapa para la vida de cualquier profesional. En mi caso, representa una parte que considero fundamental. La etapa universitaria ha tenido momentos de ingratitud y mucha felicidad lo que sin duda servirá para el resto de mi vida. Al mirar hacia atrás, uno se da cuenta que la persona que entró mira el mundo de una manera diferente a la que está saliendo y no necesariamente por lo aprendido del punto de vista académico, sino por todas las vivencias que tocan vivir en el proceso de la universidad. Es por esto que sin duda, mis primeros agradecimientos van dirigidos a la institución que me formó, la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile y con especial cariño al Departamento de Minas, considerando todas sus aristas, tanto académicos, funcionarios y compañeros. Dentro de las personas que quisiera agradecer especialmente está mi profesor guía por su tiempo, dedicación y mirada crítica a mi trabajo.

Otro factor fundamental en el desarrollo de mi carrera han sido los amigos que he formado. Mis compañeros de carrera han hecho de la vida universitaria un lugar para compartir y vivir excelentes momentos. Espero que las grandes amistades formadas trasciendan la universitaria y se mantengan en este mundo minero relativamente pequeño. Dentro de estas personas, hago especial énfasis a mis compañeros del CAM 2008 y 2009, creo que gracias a todas las personas que componen nuestra generación formamos un grupo soñador con grandes proyectos. No puedo dejar de mencionar a mis amigos de BC Lab, los cuales me han brindado todo su apoyo durante todo el desarrollo de la memoria además de tener muy gratos momentos, por hacer del lugar de trabajo un espacio alegre. Tendré los mejores recuerdos de estos últimos dos semestres.

La familia es otro de los factores determinantes para poder lograr este objetivo, por lo que es el momento de agradecer a mis padres por formarme en gran parte como la persona que soy hoy en día. Gracias a Pao y Carlito por todo el apoyo brindado para poder lograr esta meta, la cual siento que también es parte de ustedes.

Finalmente gracias a ti Pame, sin duda que sin ti, esto no habría sido posible. Gracias por tu comprensión incondicional, tu paciencia y el amor que has sentido por mí. Fuiste la mejor compañera, un pilar que me mantuvo firme durante toda la universidad. Tengo la suerte de tener a la mejor compañera con los mismos sueños y motivaciones para forjar el futuro de nuestras vidas. Todo esto es gracias a ti.

A Pamela Francisca

# ÍNDICE

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcances .....	3
2. CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES .....	4
2.1. Introducción .....	4
2.1.1. Planificación estratégica .....	5
2.1.2. Tasa de producción .....	5
2.1.3. Modelo de recursos .....	5
2.1.4. Unidad minera: Columna de extracción .....	5
2.1.5. Flujo gravitacional y mezcla .....	6
2.1.6. Cálculo de la Altura Económica .....	7
2.1.7. Suavizamiento .....	7
2.2. Herramientas de flujo gravitacional .....	7
2.2.1. Modelos Físicos, Elipsoides de Movimiento y de Extracción .....	7
2.2.2. Modelos matemáticos de flujo gravitacional .....	8
2.2.3. Autómatas Celulares .....	8
2.2.4. REBOP .....	8
2.3. Teoría de modelos de flujo gravitacional .....	9
2.3.1. Modelo volumétrico de mezcla vertical .....	9
2.3.2. Modelación de la mezcla en REBOP .....	11
2.4. Cálculo de altura de columna .....	17
2.4.1. Metodología Best Height of Draw .....	17
2.4.2. Criterio de costo de oportunidad .....	18
2.5. Secuenciamiento .....	20
2.6. Conclusiones .....	22
3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....	24
3.1. Validación MSBPC .....	24
4. CAPÍTULO 4: REVISIÓN DE MSBPC .....	28
4.1. Resumen .....	28
4.2. Modelo de Recursos .....	28
4.3. Modelo de mezcla en MSBPC .....	29
4.4. Valoración de bloques en MSBPC .....	35
4.5. Columnas de extracción en MSBPC .....	38
4.6. Suavizamiento de columnas .....	39
4.7. Secuenciamiento en MSBPC .....	42

4.8.	Plan de producción en MSBPC .....	45
4.9.	Conclusiones .....	47
5.	CAPÍTULO 5: SIMULACIONES EN REBOP .....	49
5.1.	Generación del Modelo de Bloques .....	49
5.2.	Generación de puntos de extracción .....	52
5.3.	Secuenciamiento de extracción .....	53
5.3.1.	Estudio 1 .....	56
5.3.2.	Estudio 2 .....	56
5.3.3.	Estudio 3 .....	57
6.	CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59
6.1.	Resultados MSBPC .....	59
6.2.	Resultados Estudio 1: Dilución vertical .....	61
6.3.	Resultados Estudio 2: Dilución lateral .....	68
6.4.	Resultados Estudio 3 .....	79
6.5.	Revalorización del modelo .....	88
7.	CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES .....	93
7.1.	Validación de MSBPC .....	93
7.2.	Resultados de las simulaciones .....	94
7.2.1.	Estudio sobre la dilución vertical .....	94
7.2.2.	Estudio sobre la dilución horizontal .....	95
7.2.3.	Estudio final de simulaciones .....	95
7.2.4.	Revalorización del modelo .....	96
7.3.	Recomendaciones .....	96
8.	CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA .....	98
9.	CAPÍTULO 9: ANEXO .....	99
9.1.	Código Matlab para validación Matrices de Mezcla .....	99
9.2.	Código Matlab para Matrices de Mezcla Vertical en función de marcadores de REBOP 100	
9.3.	Resultados Simulaciones Mezcla Vertical .....	102
9.4.	Resultados simulaciones mezcla horizontal .....	108
9.5.	Resultados estudio mezcla horizontal y vertical .....	115
9.6.	Valorización Económica .....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de las etapas de planificación minera de block caving tradicional (Rubio, 2008).....	4
Figura 2.2. Mecanismos de flujo (Diering, Richter, & Villa, Block Cave Production Scheduling Using PCBC, 2008).....	6
Figura 2.3. Relaciones geométricas entre los elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 1965).....	8
Figura 2.4. Modelo esquemático de curvas de mezcla utilizadas en modelo de Laubscher. ....	11
Figura 2.5. Representación grafica de la discretización de REBOP (Vargas, 2010). ....	14
Figura 2.6. Balance de masa de la herramienta. ....	14
Figura 2.7. Angulo local de desplome. ....	15
Figura 2.8. Cálculo altura de columna.....	18
Figura 2.9. Esquema de diferencia entre block y panel caving (Diering, 2008). ....	20
Figura 2.10. Ramp up, estado estacionario y Ramp down. (HOD = Altura de extracción). ....	21
Figura 3.1. Esquema general de los pasos de estudio para la validación de MSBPC. ....	24
Figura 3.2. Esquema para el proceso de cálculo de reservas en función de secuencias de extracción. ....	26
Figura 4.1. Modelo de recursos cargado en MineSight MSBPC. ....	28
Figura 4.2. PED 20%.....	30
Figura 4.3. PED 40%.....	30
Figura 4.4. PED 50%.....	30
Figura 4.5. PED 60%.....	30
Figura 4.6. PED 80%.....	30
Figura 4.7. Curvas de dilución para el ejemplo propuesto. ....	31
Figura 4.8. Modelo MSOP, PED 40%. ....	32
Figura 4.9. Modelo MSOP, PED 60%. ....	32
Figura 4.10. Modelo MSOP, PED 80%. ....	32
Figura 4.11. Comparación leyes en altura [m], PED 40%. ....	33
Figura 4.12. Comparación leyes en altura [m], PED 60%. ....	33
Figura 4.13. Comparación leyes en altura [m], PED 80%. ....	33
Figura 4.14. Error Relativo PED 40%.....	34
Figura 4.15. Relación de leyes, PED 40%.....	34
Figura 4.16. Error Relativo, PED 60%.....	34
Figura 4.17. Relación de leyes, PED 60%.....	34
Figura 4.18. Error Relativo, PED 80%.....	35
Figura 4.19. Relación de leyes, PED 80%.....	35
Figura 4.20. Listado de ecuaciones para la valoración de bloques en MSBPC (Mintec Inc., 2010). ....	36
Figura 4.21. Izquierda: Cálculo de valorización acumulada. Derecha: Visualización de HOD en MineSight MSBPC.....	39
Figura 4.22. Ventana del procedimiento de suavizado en MSBPC. ....	40
Figura 4.23. Suavizamiento en MineSight MSBPC (minimizar estéril). ....	41
Figura 4.24. Ejemplo de alturas de columnas utilizando los 3 tres criterios. ....	42
Figura 4.25. Ejemplo de secuenciamiento en MSBPC.....	42
Figura 4.26. Parámetros para generar secuencia de extracción.....	43
Figura 4.27. Forma del frente de hundimiento representado en secuencia (Brown, 2003).....	44



Figura 4.28. Forma del frente de avance en función de los esfuerzos horizontales .....	44
Figura 4.29. Avance del frente cóncavo (Brown, 2003) .....	44
Figura 4.30. Parámetros para el cálculo del plan de producción.....	45
Figura 4.31. Plan de producción en MSBPC.....	46
Figura 4.32. Parámetros de entrada para la tasa de extracción en MSBPC.....	47
Figura 5.1. Visualización de la variable "Ley CuT". Izquierda vista perfil y derecha vista en planta. ....	50
Figura 5.2. Vista en perfil de la variable "Tipo de Roca". ....	51
Figura 5.3. Variable Dilución "Ley Dil". ....	52
Figura 5.4. Vista en planta de los puntos de extracción. ....	53
Figura 5.5. P4 .....	55
Figura 5.6. P5 .....	55
Figura 5.7. P6 .....	55
Figura 5.8. P7 .....	55
Figura 5.9. P8 .....	55
Figura 5.10. Q1.....	55
Figura 5.11. Q2.....	55
Figura 5.12. Q3.....	55
Figura 5.13. Contornos de mezcla horizontal.....	57
Figura 5.14. Ejemplo de simulación en REBOP, vista en perfil. ....	58
Figura 6.1. Valorización acumulada por columna en MSBPC.....	60
Figura 6.2. Modelo de hundibilidad para la simulación de mezcla vertical en REBOP. ....	61
Figura 6.3. Curvas de mezcla para P5. ....	64
Figura 6.4. Curvas de mezcla para P6. ....	64
Figura 6.5. Curvas de mezcla para P6. ....	65
Figura 6.6. Curvas de mezcla para Q1.....	65
Figura 6.7. Curvas de mezcla para Q2.....	66
Figura 6.8. Curvas de mezcla para Q3.....	66
Figura 6.9. Relación entre leyes estimadas por mezcla y por medio de la simulación para mezcla vertical. ....	68
Figura 6.10. Mezcla horizontal por sector. P4.....	69
Figura 6.11. Mezcla horizontal por sector. P5.....	69
Figura 6.12. Mezcla horizontal por sector. P6.....	70
Figura 6.13. Mezcla horizontal por sector. P7.....	70
Figura 6.14. Mezcla horizontal por sector. P8.....	71
Figura 6.15. Mezcla horizontal por sector. Q1.....	71
Figura 6.16. Mezcla horizontal por sector. Q2. ....	72
Figura 6.17. Mezcla horizontal por sector. Q3.....	72
Figura 6.18. Comparación de dilución horizontal por pruebas. ....	74
Figura 6.19. Comparación de leyes por ubicación de puntos de extracción. ....	75
Figura 6.20. Porcentaje de dilución lateral en los puntos de extracción Panel Caving.....	76
Figura 6.21. Mapa de leyes considerando la dilución lateral por punto de extracción en Panel Caving.....	76
Figura 6.22. Porcentaje de dilución lateral en los puntos de extracción Panel Caving.....	77
Figura 6.23. Mapa de leyes considerando la dilución lateral por punto de extracción en Block Caving.....	77
Figura 6.24. Reporte Extracción P4. ....	80
Figura 6.25. Reporte Extracción P5 .....	80

Figura 6.26. Reporte Extracción P6. ....	81
Figura 6.27. Reporte Extracción P7. ....	81
Figura 6.28. Reporte Extracción Q1. ....	82
Figura 6.29. Reporte Extracción Q2. ....	82
Figura 6.30. Reporte Extracción Q3. ....	83
Figura 6.31. Modelo de mezcla considerando dilución horizontal. ....	86
Figura 6.32. Gráfico de mezcla ampliado a un 20% de columna sólida. ....	87
Figura 6.32. Valorización Acumulada por sector para Panel Caving. ....	88
Figura 6.33. Valorización acumulada por sector para Block Caving. ....	89
Figura 6.34. Techo de columnas con dilución vertical y considerando flujo horizontal. Inicial (Izquierda) y revalorizado (Derecha). ....	90
Figura 6.35. Beneficios por periodo antes y después de la revalorización. ....	91
Figura 9.1. Matriz Mezcla P4. ....	102
Figura 9.2. Matriz Mezcla P5. ....	102
Figura 9.3. Matriz Mezcla P6. ....	102
Figura 9.4. Matriz Mezcla P7. ....	103
Figura 9.5. Matriz Mezcla Q1. ....	103
Figura 9.6. Matriz Mezcla Q2. ....	103
Figura 9.7. Matriz Mezcla Q3. ....	103
Figura 9.8. Extracción P4. ....	104
Figura 9.9. Extracción P5. ....	104
Figura 9.10. Extracción P6. ....	105
Figura 9.11. Extracción P7. ....	105
Figura 9.12. Extracción Q1. ....	106
Figura 9.13. Extracción Q2. ....	106
Figura 9.14. Extracción Q3. ....	107
Figura 9.15. Contribución horizontal por sector P4. ....	108
Figura 9.16. Contribución horizontal por sector P5. ....	109
Figura 9.17. Contribución horizontal por sector P6. ....	110
Figura 9.18. Contribución horizontal por periodo P7. ....	111
Figura 9.19. Contribución horizontal por periodo Q1. ....	112
Figura 9.20. Contribución horizontal por periodo Q2. ....	113
Figura 9.21. Contribución horizontal por periodo Q3. ....	114
Figura 9.22. Perfil de leyes por prueba por periodo. ....	115
Figura 9.23. Composición de Dilución por prueba. ....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2. Herramientas disponibles para flujo gravitacional.....	9
Tabla 4.1. Resumen Error Cuadrático Medio.....	35
Tabla 4.2. Modelo Económico ingresado a MSBPC.....	36
Tabla 4.3. Parámetros económicos de entrada.....	38
Tabla 4.4. Comparación de valorización entre MSBPC y propuesta.....	38
Tabla 5.1. Distribución de leyes en altura.....	51
Tabla 5.2. Tipos de Pruebas para simulaciones en REBOP.....	54
Tabla 5.3. Tipos de pruebas para la simulación en REBOP.....	56
Tabla 5.4. Parámetros de entrada para las simulaciones en REBOP.....	57
Tabla 6.1. Resultados de leyes diluidas en MSBPC por columna.....	59
Tabla 6.2. Parámetros económicos para definición de reservas.....	60
Tabla 6.3. Reporte de reservas en MSBPC.....	61
Tabla 6.4. Resultados de la extracción en REBOP para mezcla vertical.....	62
Tabla 6.5. Diferencia entre Panel y Block Caving para mezcla vertical.....	63
Tabla 6.6. Resultados matrices de mezcla vertical por prueba.....	67
Tabla 6.7. Resumen matrices de mezcla vertical.....	67
Tabla 6.8. Resumen de contribución lateral por pruebas.....	73
Tabla 6.9. Resumen de dilución horizontal por método de secuenciamiento.....	74
Tabla 6.10. Diferenciación de ley entre los puntos centrales versus puntos externos.....	76
Tabla 6.11. Comparación de la dilución lateral en puntos externos laterales.....	78
Tabla 6.12. Comparación de la dilución lateral en puntos externos esquinas.....	78
Tabla 6.13. Resultados de extracción por prueba.....	83
Tabla 6.14. Resumen de extracción para Block/Panel Caving.....	84
Tabla 6.15. Comparación de reservas según método de secuencia.....	84
Tabla 6.16. Matriz de diferencias relativas entre Block/Panel y Pre-Mezcla para finos.....	85
Tabla 6.17. Matriz de diferencias relativas entre Block/Panel y Pre-Mezcla para leyes.....	85
Tabla 6.18. Reservas revalorizadas por BHOD.....	90
Tabla 6.19. Resultados de VAN operacional antes y después de la revalorización.....	91
Tabla 9.1. Modelo Económico de MSBPC.....	117
Tabla 9.2. Ejemplo de valorización de columna.....	118

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

En la actualidad existe un notable crecimiento de nuevos proyectos mineros enfocados a la explotación mediante métodos masivos de hundimiento como el block o panel caving, tanto en Chile como en el resto del mundo. Un ejemplo de aquello son los proyectos del Nuevo Nivel Mina de El Teniente, Nueva Andina Fase II, Mina Chuqui Subterránea y otros a lo largo del mundo como DOZ, Grasberg, Palabora, Resolution, Oyu Tolgoi entre otras.

Sin duda, el gran desarrollo que ha ocurrido en la minería por hundimiento está relacionado con las nuevas tecnologías que implican una baja de costos, tanto para la explotación propiamente tal como para los servicios de apoyo e ingeniería. Por otro lado, la planificación de minas de block o panel caving ha venido dada, durante mucho tiempo, por métodos tradicionales que luego del desarrollo inicial de software como herramientas de planificación, sistemáticamente han mejorado el proceso de estimación de reservas para este tipo de minería. Recién a finales de la década de los 80 logra salir al mercado un software que permitiría un apoyo sustancial en la planificación de largo plazo para minas de block/panel caving, conocido como “PC-BC”, desarrollado por la empresa GEMCOM. Este software incorporaba los últimos avances en la planificación de minas de block/panel caving considerando que en sus primeras versiones el programa utilizaba un número de relaciones empíricas desarrolladas para este tipo de operaciones para generar un modelo de mezcla desarrollado por Dennis Laubscher. El programa fue entonces capaz de modelar algunos de los procesos de mezcla de material que tienen lugar en la zona hundida. Esto permitió mejorar las predicciones de leyes explotables y, por lo tanto, lograr un mejor potencial del negocio minero para mejorar el control de leyes y las estimaciones de reservas extraíbles.

El proceso de mezcla ha sido largamente estudiado durante los últimos 50 años. Durante estas décadas se han sostenido teorías para el material que está siendo extraído por hundimiento. Sin embargo, hasta el día de hoy no se ha podido comprobar la exactitud real de cada uno de estos modelos, debido principalmente a la dificultad y limitaciones tecnológicas para medir el fenómeno real en el macizo rocoso durante la explotación. Han pasado poco más de 20 años de la aparición de este software en el mercado y hoy en día pareciera ser la herramienta más robusta que se tiene. Sin embargo, durante este tiempo, si bien esta herramienta se ha ido mejorando paso a paso al cabo del desarrollo de nuevas investigaciones, sigue teniendo los mismos principios fundamentales de mezcla, lo que ha llevado a diferentes empresas, tanto mineras como de desarrollo de ingeniería, a tratar de implementar sus propias mejoras según el caso lo requiera debido a la generalidad de los fundamentos y la gran variabilidad que existe entre una mina y otra, como el caso de El Teniente que cuenta con sus propias modificaciones del modelo original. La carencia de herramientas actualizadas para la planificación de largo plazo en minas explotadas por block/panel caving ha implicado una demanda en la investigación lo que ha permitido desarrollar herramientas basadas en principios distintos a los mencionados para PC-BC, tales

como PFC, Flowsim y REBOP. Estas herramientas corresponden a modelos de flujo gravitacional que emplean distintos principios que se verán con más detalle en el próximo capítulo e integran de manera más explícita el fenómeno del mezclamiento.

La motivación principal para realizar el trabajo de título se basa en la carencia de herramientas robustas para modelar la mezcla (entiéndase como tal, la mezcla de material producido por la extracción realizada en la explotación por hundimiento) con el desarrollo actual de la investigación en el tema. PC-BC acapara prácticamente la totalidad del mercado en cuanto a software de planificación de block/panel caving basado en un principio que lleva cerca de dos décadas. En este trabajo se pretende estudiar una herramienta que se basa en los mismos principios de Laubscher, llamada MSBPC, desarrollada por Mintec Inc. Dada esta problemática, es necesario tener un alto nivel de entendimiento en cuanto a cómo se realiza la estimación de reservas para minas subterráneas explotadas por block/panel caving. Esto hace referencia sobre qué es la planificación de este tipo de minería, cómo se realiza y lograr un entendimiento de las herramientas actuales disponibles para generar la estimación de reservas.

Considerando la restricción tanto de PC-BC como de MSBPC, siendo ambas herramientas de pre-mezcla, se pretende estudiar la diferencia que ocurre en la estimación de reservas debido al flujo gravitacional mediante un software de flujo como REBOP sobre cómo varían las reservas en función de la secuencia de extracción, considerando Block y Panel caving.

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Objetivo general*

Establecer una metodología del proceso de planificación para Block/Panel Caving que incorpore los avances en el conocimiento de la mecánica del caving a partir de un modelo de flujo gravitacional para la estimación de reservas en función del secuenciamiento de extracción.

### *1.2.2. Objetivos específicos*

- Revisión bibliográfica de los fundamentos de planificación de minería de block/panel caving y revisión empírica de las herramientas de planificación de block/panel caving con el fin de lograr un entendimiento acabado sobre cómo se genera actualmente la estimación de reservas. En el caso de las herramientas empíricas se utilizará MSBPC, que corresponde a una herramienta actualmente en desarrollo, y por otra parte REBOP que es el software que se utilizará como herramienta de flujo con un modelo de bloques en común, estudiando la mezcla y la estimación de reservas propias de cada modelo en función de la secuencia de extracción.
- Plantear en una etapa conceptual la validación de la aplicación MSBPC utilizado por Mintec Inc. Validar su metodología en conjunto con la proposición de posibles mejoras o cambios en el procedimiento con el fin de hacer una herramienta con potencial para establecer un nuevo negocio en los softwares de diseño y planificación de block caving.

- Definir un modelo de bloques para el caso de estudio y las distintas secuencias acorde con parámetros reales de estudios anteriores en REBOP y con las restricciones propias de MSBPC.
- Cuantificar diferencias en las reservas con respecto a las secuencias de extracción reportadas por REBOP y analizar nuevas envolventes económicas en MSBPC.
- Cuantificar el efecto de la dilución lateral no incluida en MSBPC ya que sólo simula una pre-mezcla vertical.
- Estudiar la posibilidad de mejora al proceso de estimación de reservas utilizando la información obtenida de acuerdo a los resultados de las simulaciones e implementándola en la metodología propuesta.

### **1.3. Alcances**

La validación de MSBPC corresponde a analizar los principales procesos del software con el fin de encontrar posibles mejoras, analizar su implementación centrándose en el modelo de mezcla incorporado por el programa que corresponde al modelo volumétrico vertical realizado por Denis Laubscher. En cuanto a la valorización de columnas se utiliza el algoritmo del máximo beneficio acumulado en función de un modelo económico.

Dentro del estudio no está contemplado el análisis de la ubicación del nivel de hundimiento. La razón principal corresponde a que la sensibilidad principal del estudio corresponde a las secuencias de extracción de un mismo modelo de bloques por lo que se pretende fijar esta variable de manera que no intervenga en los resultados de reservas de forma conjunta a la mezcla debido a la secuencia de extracción.

Para el estudio se considera que REBOP ya se encuentra validado como herramienta de flujo gravitacional, determinado por trabajos anteriores y el último de estos realizados por la Universidad de Chile. Para las simulaciones de REBOP se utilizarán los parámetros propuestos para el proyecto de Nuevo Nivel Mina realizado por la Universidad de Chile con el fin de obtener resultados acorde a parámetros que se adecuaron al caso real.

## CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

### 2.1. Introducción

En este capítulo se muestra la revisión del estado del arte para el cálculo de reservas en minería de hundimiento haciendo énfasis en las metodologías aplicadas para Panel y Block Caving. La estimación de reservas de minas explotadas por hundimiento es parte de todo un proceso de planificación complejo por lo que es necesario entender los fundamentos de las herramientas actuales para determinar posibles modificaciones que determinen un proceso alternativo obteniendo las reservas extraíbles con herramientas avanzadas que modelen el proceso de mezcla. Las etapas de planificación de largo plazo en block caving puede ser ejemplificada conceptualmente de la siguiente forma (Rubio, 1998).

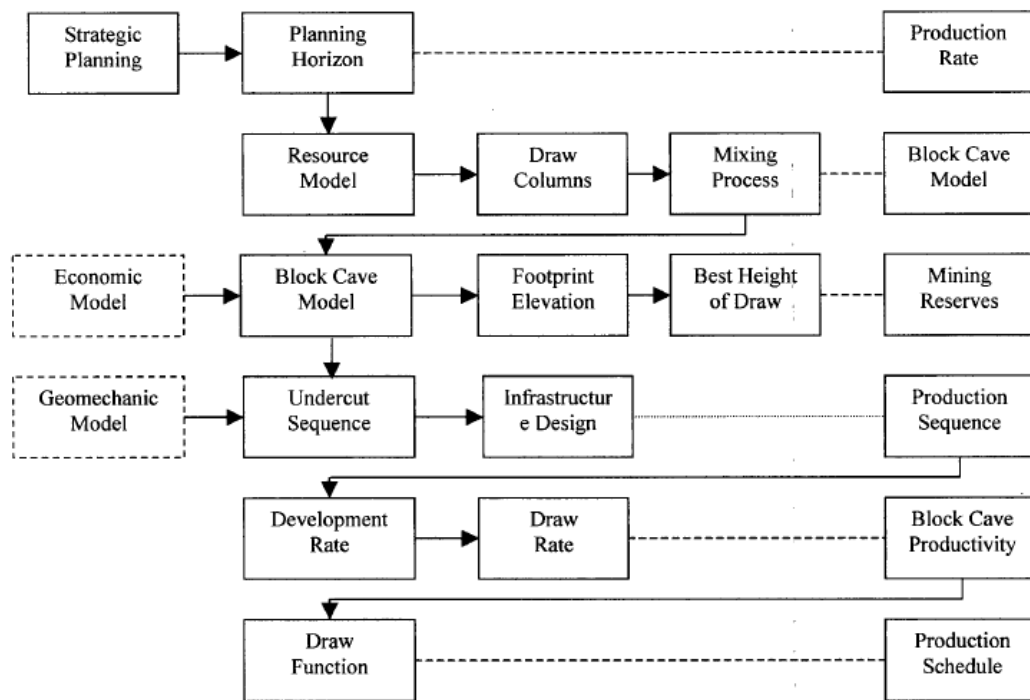


Figura 2.1. Esquema de las etapas de planificación minera de block caving tradicional (Rubio, 2008)

Los pasos presentados corresponden a la metodología clásica, desde la planificación estratégica hasta definir un plan de producción. Los software para la planificación minera de block caving aparecen como herramientas importantes para la determinación de cada una de las etapas generando finalmente un producto bancario.

### *2.1.1. Planificación estratégica.*

Como primer paso se encuentra la planificación estratégica. En este paso se definen los objetivos del proyecto tales como mantener una producción estable, maximizar los retornos o maximizar la vida de la mina, entre otros. En general los objetivos dependerán de cada compañía. Los horizontes de planificación se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero. Generalmente, la planificación resultante de un plan de largo plazo es menos acertada que una planificación de corto plazo debido a las grandes diferencias en calidad y cantidad de información usada en los modelos.

### *2.1.2. Tasa de producción.*

La tasa de producción define la cantidad de tonelaje a tratar por período, tanto en la mina como en la planta de procesamiento. Se determina de acuerdo a criterios económicos en la planificación estratégica y generalmente viene dada por la infraestructura existente tal como la planta, equipos y los desarrollos subterráneos. En algunos casos este parámetro es una variable que dependerá de la cantidad de mineral y recursos económicos disponibles. En el estudio se trabajará con una tasa de extracción fija.

### *2.1.3. Modelo de recursos.*

Los atributos necesarios para generar un modelo de recursos son los siguientes:

- Leyes de los metales de interés económico y de las impurezas.
- Tipo de Roca.
- Modelo Geotécnico (FF/M, RQD, RMR).
- Densidad, muy importante para el cálculo del tonelaje.
- Modelo de Fragmentación.
- Dureza ( $W_i$ ).
- Parámetros metalúrgicos.

### *2.1.4. Unidad minera: Columna de extracción.*

Este paso corresponde a encontrar la unidad básica de explotación minera apropiada que represente el método de extracción. Los métodos de explotación por hundimiento contienen puntos de extracción. Cada punto de extracción corresponde a una excavación cuya finalidad es extraer el material quebrado que se encuentra sobre él. A medida que se genera la extracción, Kvapil (1965), postula que sobre cada punto se genera una zona de perturbación de material sobre la extracción llamada elipsoide de extracción. Cuando la altura de este elipsoide es lo suficientemente alta, como ocurre en block/panel caving, se le llama columna de extracción. Por lo tanto, lo que necesita ser modelado en block/panel caving son las columnas de material donde cada una representa la proyección de material extraído por punto de extracción como unidad básica minera.



### 2.1.5. Flujo gravitacional y mezcla

Se entenderá como flujo gravitacional el proceso en el cual un material, producto del caving, se mueve desde su posición inicial por efecto de la gravedad. Esto es un método de transporte de material granular que resulta ser eficiente en términos energéticos y por tanto, bajo en costo de transporte. Para el caso de minas de block caving, corresponde al proceso en el cual el material quebrado se mueve desde su posición in situ hacia los puntos de extracción en el nivel de producción. En la práctica, el flujo gravitacional tiene un impacto directo en la recuperación y el contenido de dilución (Castro, 2006).

El proceso de flujo gravitacional ocurrido durante la extracción es un proceso altamente complejo del cual no existen modelos determinísticos, considerando la cantidad de variables naturales que influyen en el proceso. Dada esta problemática, se han creado aproximaciones empíricas y modelos numéricos que son capaces de definir la mezcla que ocurre en las columnas de extracción y el flujo gravitacional.

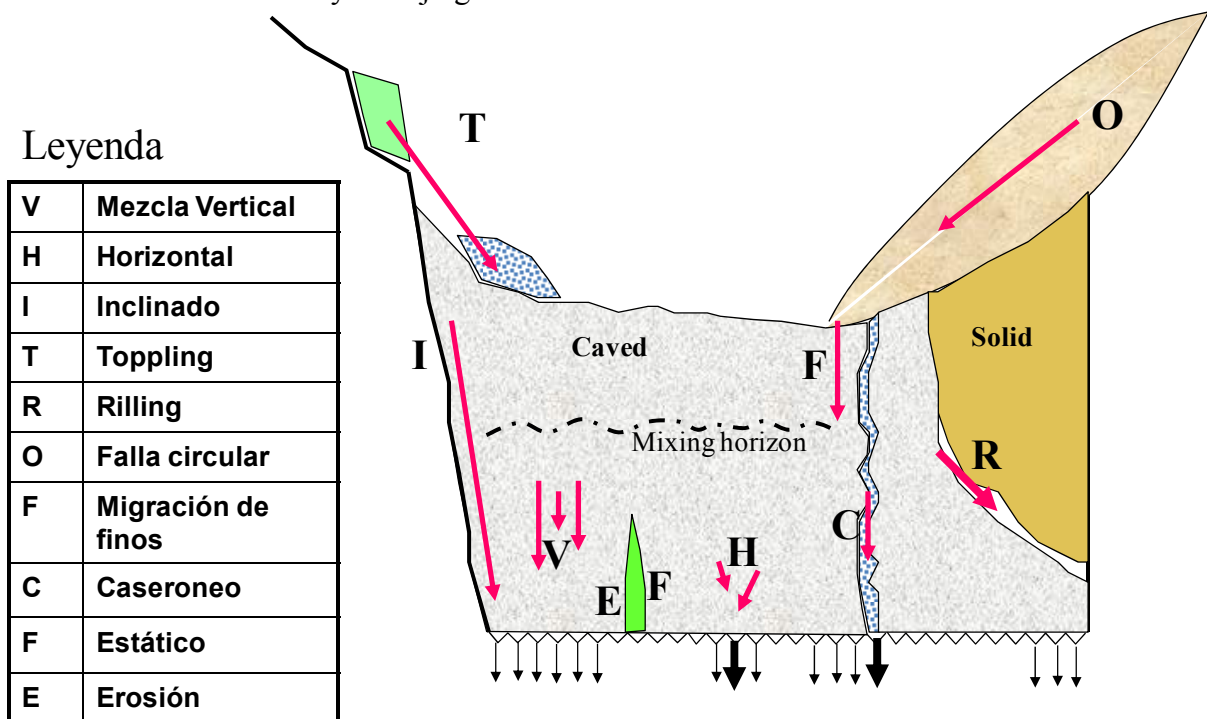


Figura 2.2. Mecanismos de flujo (Diering, Richter, & Villa, Block Cave Production Scheduling Using PCBC, 2008).

La figura anterior presenta un esquema con los mecanismos típicos de flujo que ocurren durante el proceso del caving. Las variables más importantes que influyen en la dilución son (Laubscher, 1994) la geometría del yacimiento, la geometría de la mina, la granulometría de la fragmentación, el rango de fragmentación para estéril y mineral, la distribución de leyes de mineral y estéril, la interacción entre los puntos de extracción, la fragmentación secundaria y finalmente el control de tiraje.

Durante este trabajo se entenderá por dilución todo el material que no se encuentre dentro de la envolvente económica predefinida.

La envolvente económica está referida al límite de explotación determinado mediante un modelo económico en el cual se define el área basal a ser extraída y luego el techo de las columnas respectivas a los puntos de extracción en el área basal.

#### *2.1.6. Cálculo de la Altura Económica*

Este paso corresponde a evaluar las alturas de cada columna de extracción en función de un modelo económico. En la actualidad existen principalmente dos metodologías. La primera corresponde a evaluar la altura en función del beneficio acumulado por bloques llamada “*best height of draw*” (Diering, Richter, & Villa, 2008) y la otra se basa en el criterio de costo de oportunidad basado en la metodología de K. Lane (De la Huerta, 1994).

#### *2.1.7. Suavizamiento*

Esta etapa comprende la operativización de la envolvente económica con un criterio de suavizamiento de las columnas en función de las vecindades. Este criterio está relacionado con la estrategia que puede privilegiar maximizar la cantidad de mineral, minimizar la cantidad de estéril o un criterio intermedio.

El suavizado es la última etapa dentro del proceso de definición de reservas extraíbles, los pasos posteriores corresponden principalmente a determinar una secuencia de hundimiento y extracción óptima de acuerdo a los criterios planteados en la planificación estratégica.

## **2.2. Herramientas de flujo gravitacional**

Se han realizado diversos estudios utilizando modelos físicos de flujo gravitacional en las últimas décadas y cuyos resultados han sido aplicados en el diseño de mallas de extracción para Block/Panel Caving y al diseño de los subniveles para el caso de Sublevel Caving. A continuación se muestra una revisión del estado del arte de los métodos para caracterizar el flujo gravitacional de la roca quebrada (Vargas, 2010).

#### *2.2.1. Modelos Físicos, Elipsoides de Movimiento y de Extracción*

Los experimentos realizados por Kvapil (1965) mostraban la existencia de dos volúmenes que caracterizaban el flujo granular; el primero, llamado elipsoide de extracción, que se define en función de la ubicación original del material extraído del punto de extracción, y el segundo, llamado elipsoide de movimiento, definido por el límite entre el material que cambió de posición y el material que permaneció en reposo (Figura 2.3). (Vargas, 2010)

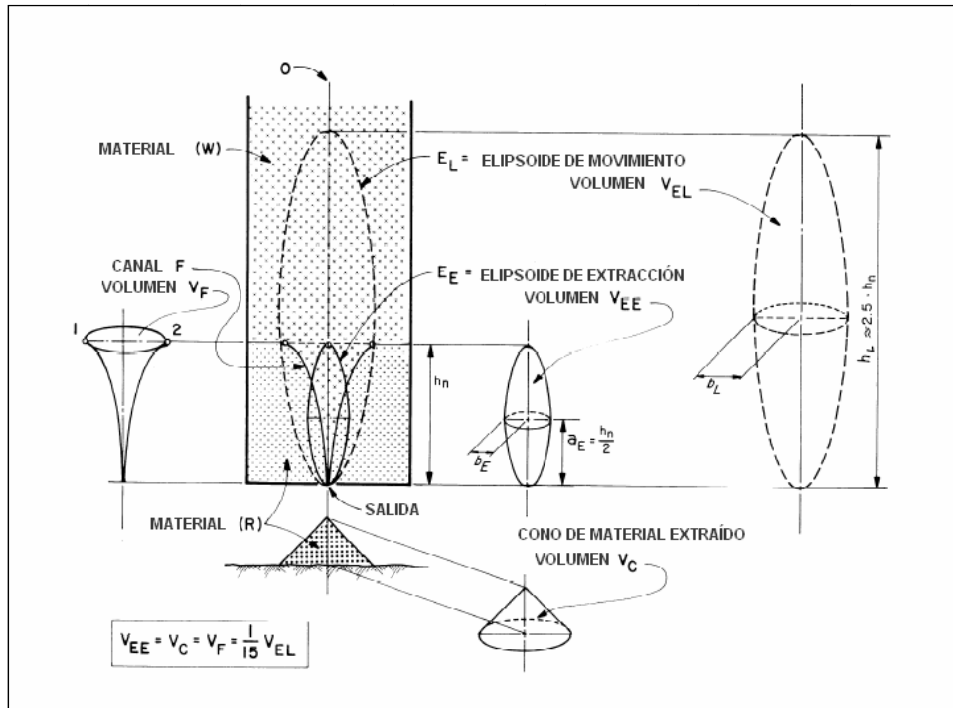


Figura 2.3. Relaciones geométricas entre los elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 1965).

### 2.2.2. Modelos matemáticos de flujo gravitacional.

Entre las herramientas matemáticas disponibles se tienen aquellas que utilizan un enfoque estocástico o de “autómatas celulares” (Castro, 2006) y aquellos basados en la resolución de ecuaciones de balance y conservación de masa (Pierce, 2009).

### 2.2.3. Autómatas Celulares

Un Autómata Celular (AC) corresponde a un modelo matemático que simula a un sistema de elementos, el cual evoluciona en pasos discretos de acuerdo a ciertas restricciones. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección de objetos simples que interactúen localmente unos con otros. (Vargas, 2010)

### 2.2.4. REBOP

Rapid Emulator Based on PFC3D, conocido como REBOP por sus siglas en inglés, (Pierce, 2009), es un software desarrollado recientemente en el marco del International Caving Study basado en los mecanismos observados en PFC3D (Particle Flow Code on 3D, Itasca Inc.) y en modelos físicos para lograr simular la evolución de los elipsoides de extracción y su interacción. Su formulación está basada en la resolución de ecuaciones de balance de masas que determinan una zona de extracción aislada, la cual evoluciona fundamentándose en que el material fluye desde una zona de baja porosidad hacia una zona de alta porosidad en el interior del elipsoide. Los dos mecanismos que considera son: la evolución del elipsoide en

altura mediante el colapso del arco de movimiento (crecimiento vertical) y la evolución horizontal controlada por la erosión. (Vargas, 2010)

En REBOP el material que se encuentra sobre cada punto de extracción es dividido en secciones horizontales (*layer*), cada sección es calculada repetitivamente de forma ascendente para conservar el flujo másico entre ellas. Cada sección o parte de esta, mediante una tasa de flujo, pasará a la siguiente a través de un balance de masa producto de la expansión local de los elipsoides. Si las tajadas interceptan la superficie, el flujo solamente cambiará la forma de la superficie (Itasca, 2007).

A continuación se presenta una tabla resumen de las herramientas que actualmente se utilizan para el Modelamiento del flujo gravitacional (Castro, Tamburrino, & Fernández, 2010).

Tabla 2.1. Herramientas disponibles para flujo gravitacional.

Nombre del Paquete	PCBC Block cave	FlowSim Cave Sim	Kinematic Plasticity	DEM PFC UDEC	REBOP
Etapa de Desarrollo	Comercialmente Disponible	Investigación y Desarrollo	-	-	-
Base de cálculo	Reglas de Mezcla	Autómata Celular (CA)	Cinemática (KM)	Medios Discretos	Balance de Masa
Construido para	Simular el mezclamiento vertical y horizontal para block caving	Simular el mezclamiento horizontal y vertical y patrones complejos	Simular extracción aislada en silos	Estudio de los fundamentos del flujo gravitacional para block caving	Simular el mezclamiento horizontal y vertical para block caving

De la tabla se puede apreciar que la única herramienta comercialmente disponible corresponde a PCBC. Mientras que MSBPC, siendo el software que se utilizará en este estudio, no aparece en la tabla propuesta ya que es una herramienta que actualmente se encuentra en una etapa de desarrollo. También utiliza el modelo volumétrico de mezcla vertical de Laubscher, de forma similar a PC-BC.

### 2.3. Teoría de modelos de flujo gravitacional

#### 2.3.1. Modelo volumétrico de mezcla vertical

Laubscher plantea un modelo volumétrico o de mezcla vertical (Laubscher, 1994, 2000) que infiere la mezcla que se produce debido a la extracción minera. El modelo lineal de mezcla consiste en un sistema gráfico que permite predecir la mezcla vertical, leyes extraíbles y recuperación de tonelaje a partir de la distribución inicial de leyes in-situ para una mina explotada por block caving.

La metodología de mezcla propuesta de Laubscher ha sido utilizada ampliamente por la industria minera e implementada en software de predicción de mezcla como MSBPC o PC-BC (Diering, Richter, & Villa, 2008).

El primer paso para el cálculo de la mezcla consiste en la determinación de “porcentaje de la entrada de dilución” PED. Se entenderá como PED al porcentaje de la columna de mineral que alcanzó a ser extraído antes de que aparezca dilución en los puntos de extracción. Depende de la altura de columna  $H_c$ , del factor de esponjamiento  $s$ , de la altura de interacción  $HIZ$ , y de la desviación estándar en tonelaje de los puntos activos con respecto a sus vecinos llamado “draw control factor” o “dcf” por sus siglas en inglés (Laubscher, 1994). Esta última se muestra como un factor de control del tiraje y se mide a una escala mensual. (Vargas, 2010).

El factor de esponjamiento  $s$  es el incremento de volumen que experimenta la columna extractiva con la propagación del hundimiento. Los valores propuestos por Laubscher están relacionados con el tipo de fragmentación esperada; 1,08 para fragmentación gruesa, 1,12 para fragmentación media y 1,16 para fragmentación fina.

$$PED = \frac{(H_c \times s - HIZ) \times dcf}{H_c \times s} \times 100 \quad [1]$$

Los pasos a seguir, luego de encontrar el punto de entrada de dilución son los siguientes:

- Se considerará una columna *in situ* de mineral formada por segmentos de altura  $h$  y un volumen  $v$ , cuyas leyes y densidades *in situ* se designarán por  $l_i$  y  $d_i$  respectivamente, tal como muestra la (Figura 2.4. Modelo esquemático de curvas de mezcla utilizadas en modelo de Laubscher.). La cota base de la columna será el nivel de hundimiento y corresponderá al 0% de extracción. El contacto mineral-estéril corresponderá al 100% ejemplificado en la línea horizontal de color azul.
- Con el dato del punto de entrada de dilución (en porcentaje) se traza una línea de A a C, considerando como el punto A la entrada de dilución entre el 0% de la columna *in-situ* hasta el 100% determinado por el contacto inicial mineral-estéril indicado por la línea AC. Esta línea tiene que pasar por M, punto medio entre el contacto mineral-estéril. Del modelo se aprecia que cuanto más temprana es la entrada de la dilución, más inclinada será la pendiente de la recta de contacto estéril-mineral. La misma operación se realizará para determinar las líneas de contacto entre un banco y otro (Figura 2.4. Modelo esquemático de curvas de mezcla utilizadas en modelo de Laubscher.).
- Luego de haber construido el gráfico se pueden calcular las leyes por sección y la ley media total de la columna diluida. Para calcular leyes puntuales por sección se necesita ponderar el volumen aportado por cada nuevo volumen escalado en la sección original con sus leyes respectivas como lo muestra la sección 1 en colores para las diferentes áreas que entran dentro del volumen de la sección 1. Este proceso se hace para cada sección y luego la ley media de la columna resulta ser la ley total del bloque diluido considerando las leyes puntuales de cada sección.

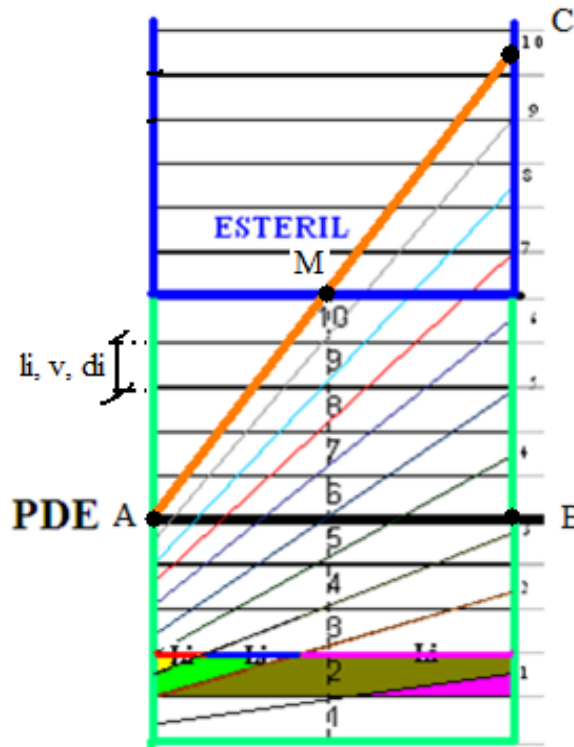


Figura 2.4. Modelo esquemático de curvas de mezcla utilizadas en modelo de Laubscher.

Dentro de las aproximaciones del modelo volumétrico se tiene que las curvas de mezcla son empíricas y no extraídas a partir del flujo gravitacional. El modelo no integra la fragmentación en altura y su variación en el tiempo, y no permite variaciones en el PDE en función del tiempo. (Vargas, 2010).

### 2.3.2. Modelación de la mezcla en REBOP

Esta herramienta de flujo fue desarrollada en el marco del International Caving Study en el año 2002 y se basa en una serie de fundamentos de flujo gravitacional observados en PFC3D, cuyo objetivo es simular, de manera rápida, la cinemática del flujo gravitacional basado en los principios que se indican a continuación. Estos principios son propuestos por Pierce (2009) y vueltos a explicar por Vargas (2010).

- El medio se discretiza en secciones y la masa asociada al flujo gravitacional pasa de una sección superior a otra inferior.
- Ecuaciones de balance de masa controlan el movimiento del material que fluye de la tajada superior a la tajada al siguiente.
- El material se mueve desde una zona de baja porosidad, ubicada en la región que no sufre movimiento, a una zona de alta porosidad producto de la extracción.

- El mecanismo que controla el crecimiento vertical será el colapso. Es así como la tajada superior colapsará debido al aumento de porosidad de las regiones superiores. La expansión lateral del elipsoide de extracción estará controlado por el mecanismo denominado erosión, que aumenta de forma progresiva a medida que el material fluye. De esta forma, el material que se encuentran en las proximidades se integra al flujo produciendo que el elipsoide aumente su radio.
- El área de expansión depende de la diferencia en área entre dos capas. En caso de ser las dos áreas idénticas el material simplemente se trasladará por completo al nivel inferior. Cuando el área superior es menor que la de la parte inferior, el material pasará al nivel inferior aumentando su porosidad y expandiendo su volumen.
- Cuando el elipsoide de movimiento alcance la superficie, la porosidad permanecerá constante y el balance de masa satisface: (a) una reducción en la topografía y (b) una expansión lateral de la zona de extracción producto del aumento de la porosidad.
- Para el cálculo interno de las leyes, la herramienta discretiza el medio mediante marcadores, que tendrá, un volumen determinado por el usuario y características correspondientes a su origen. Este marcador se moverá de acuerdo al perfil de velocidades impuesta por el flujo y cuando sean extraídos se le asociará la masa correspondiente al volumen inicial.

### **Parámetros de entrada**

El estado inicial del material en REBOP es descrito bajo un arreglo tridimensional de bloques. Los bloques pueden tener distinto tamaño en las tres direcciones cartesianas. El techo del modelo de bloques será la topografía y los contornos serán rígidos para el flujo de mineral. Es posible definir para cada bloque del modelo propiedades que definirán las características del flujo gravitacional como la fragmentación, el ángulo de fricción, la porosidad, densidad y las leyes de las especies de interés (Vargas, 2010).

#### *a) Modelo de bloques*

El modelo de bloques consiste en un conjunto de bloques, definidos en un espacio tridimensional, con los siguientes atributos:

- Posición
- Leyes

- Ángulo de fricción: Controla el ángulo de flujo del elipsoide de extracción. Este parámetro es de importancia ya que define las características geométricas de la parte inferior del elipsoide.
- Porosidad: Existe una porosidad inicial (in-situ) y una porosidad posterior al hundimiento considerándola como porosidad máxima.
- Fragmentación: Controla el grado de erosión y el desarrollo del ancho de la zona de movimiento. Se caracteriza mediante una distribución Gausiana con su diámetro medio esperado y su desviación estándar. Corresponde a la fragmentación primaria esperada, es decir, es constante en el tiempo.

b) *Puntos de extracción y zanjas*

Los puntos de extracción se ubican siguiendo un arreglo tridimensional y serán parte de la configuración de la zanja.

c) *Tiraje programado*

Se entenderá por tiraje programado a la cantidad de material que se extraerá por punto de extracción en un determinado periodo (diario, semanal y/o mensual). La unidad de medida estará representada por toneladas y la cantidad de masa que se extraiga por el punto determinará la secuencia de extracción (Vargas, 2010).

### **Parámetros de salida**

Los parámetros de salida dependen de lo fina que se escoja la malla de marcadores internos que tiene el programa para realizar los cálculos. Las mallas pueden ser del mismo orden de magnitud del modelo de bloques o fracciones de este. En una malla media, los marcadores son una décima sexta parte de un bloque del modelo de bloques.

### **Fundamentos matemáticos de REBOP**

a) *Evolución del Elipsoide de Extracción.*

La evolución del elipsoide de extracción está determinada por dos mecanismos: colapso y erosión. REBOP considera que el material se puede representar mediante una serie de secciones distribuidas en la vertical y el elipsoide mediante una serie de cilindros en altura (Itasca Inc, 2008). El flujo de material está controlado por la masa que fluye de la tajada superior, representado en la figura 2.6 como  $i$ , a la inferior  $i-1$ , producto del aumento en porosidad. La masa que pasará de la tajada superior a la inferior estará determinada por la masa que incorpora la tajada superior, más la masa extra producto del colapso y la masa extra producto de la erosión. (Ecuación 2).



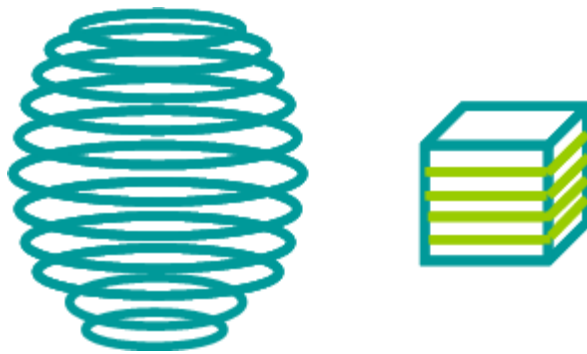


Figura 2.5. Representación grafica de la discretización de REBOP (Vargas, 2010).

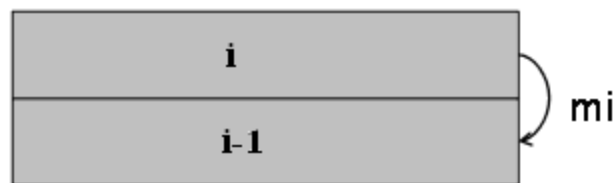


Figura 2.6. Balance de masa de la herramienta.

$$\dot{m}_{i-1} = m_i + m_i^{(*)} + m_{i-1}^{(**)} \quad [2]$$

- $\dot{m}_{i-1}$ : Masa total traspasada.
- $m_i$ : Flujo proveniente del layer superior
- $m_i^{*}$ : Masa extra producto del colapso del layer  $i+1$
- $m_{i-1}^{**}$ : Masa extra producto de la erosión del layer  $i$

Para el cálculo de la masa extraída mediante el proceso de erosión, la herramienta de flujo define  $r$  como el radio que ocupará el material producto de la dilatación del layer  $i$ , mediante la relación entre volumen de espacios vacíos y el volumen del layer  $i$  (Ecuación 2). Consideraciones de estabilidad sugieren que  $r$  es función del ángulo de desplome local en los contornos del elipsoide de extracción (Ecuación 3) donde  $R_i$  es el radio del layer  $i$ , y  $R_{i-1}$  el del layer inferior.

Bajo el supuesto de que el mecanismo de erosión es mayor circundando la parte superior del elipsoide de extracción, debido a que el material estático en el perímetro del layer  $i$  es cortado con una mayor fuerza por el movimiento del material en el layer  $i-1$ , para que en una segunda etapa colapse, se plantea que donde el ángulo local de desplome,  $\beta_i$ , sea negativo se deberá

asumir la existencia de un ángulo umbral de desplome  $\beta_t$  (Pierce, 2009). Si este ángulo  $\beta_i$  es menor que  $\beta_t$ ,  $r$  será igual a uno y todos los espacios del layer serán ocupados a través de la dilatación del material que se encuentra en la vecindad del perímetro.

$$r = \frac{V_i^d}{V_i} \quad [3]$$

$$\beta_{i=} = \frac{R_i - R_{i-1}}{h} \quad [4]$$

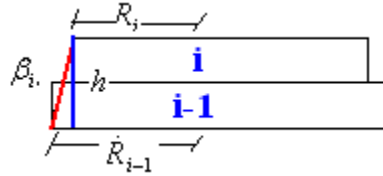


Figura 2.7. Ángulo local de desplome.

Cuando el ángulo local de desplome es positivo el material en el perímetro del layer es más estable obstaculizando la incorporación de masa a través de la erosión. Estudios experimentales (Pierce, 2009) evidencian la existencia de un mínimo ángulo positivo de desplome, donde más allá de él no es posible la expansión. Este mínimo ángulo está relacionado con el ángulo de fricción del material (Ecuación 5).

$$\beta_{\min} = \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad [5]$$

Para generalizar la expansión de los layer, Pierce (2009), propone que el radio del layer  $i$  puede ser incrementado debido a la dilatación del material ubicado en su perímetro para rellenar los espacios provocados ( $v_i$ ) mediante la siguiente ecuación en función de la porosidad inicial y final.

$$R_i = \sqrt{R_i^2 + \frac{v_i^d}{\pi h(n_1 - n_0)}} \quad [6]$$

En la superficie la porosidad permanecerá constante y el balance de masa será satisfecho mediante una disminución en la topografía y una expansión lateral del elipsoide de extracción resultando en un incremento de volumen y porosidad.

b) *Caracterización del flujo gravitacional*

Junto con lograr caracterizar la forma del elipsoide de extracción se debe caracterizar de una forma precisa como se está realizando el movimiento interno del material. Para esto será necesario (Pierce, 2009):

- Predecir la localización y distribución al interior de la zona de movimiento del material que aún no se ha extraído.
- Predecir la mezcla del material que llega al punto de extracción en función de la masa extraída.

Para lograr la localización y distribución al interior de la zona de movimiento (material que aún no ha sido extraído por el punto de extracción) se tiene en cuenta que el sistema está caracterizado con una coordenada original (0,0,0) y que una vez realizada la extracción poseerá una ubicación espacial (x,y,z) diferente y acorde al movimiento realizado.

Para lograr una correcta caracterización del material que ha salido por el punto de extracción se requiere un arreglo de marcadores de volumen  $V_{\text{mark}}$ , (Ecuación 7), que tendrán las características del bloque donde se posicionó inicialmente. Los marcadores se moverán de acuerdo al perfil de velocidades impuesto al flujo gravitacional y trayendo con ello la información que se le imprimió inicialmente. Así, cuando el material sea extraído se podrá asociar un determinado número de marcadores y la mezcla, producto del flujo gravitacional, queda determinada. Por ejemplo, el cálculo de la ley se realizará a partir del fino asociado a los marcadores extraídos (cada marcador tendrá una masa asociada y ley) y a la masa total de todos los marcadores que se extrajeron.

$$m_m = V_m (1 - \eta_0) \rho_0 \quad [7]$$

$m_m$ : Masa asociada al marcador

$V_m$ : Volumen asociado al marcador (espaciamiento del marcador al cubo)

$\rho_0$ : Densidad de la posición inicial del marcador

$\eta_0$ : Porosidad inicial del marcador.

De la elección del espaciamiento de marcadores, dependerá la resolución para la forma del elipsoide de extracción, sin embargo, se necesitará al menos un marcador por *layer* y la máxima cantidad estará determinada por la capacidad de procesamiento del computador a utilizar.

## 2.4. Cálculo de altura de columna

Junto con el modelo de recursos diluido para block/panel caving será necesario definir el modelo económico. Se definen los términos de referencia asociados a los costos unitarios en el proceso minero junto con los precios de los metales de interés. Con estos datos se procede a calcular o definir con fundamentos técnicos el nivel de hundimiento. Una vez definida etapa, se procede a calcular la altura económica de cada columna.

Tradicionalmente, el concepto de ley de corte marginal ha sido usado para definir las reservas en los rajos abiertos. En el caso de la definición de altura extraíble también se puede utilizar este concepto, determinando la altura como aquella para la cual ya no se perciben beneficios.

El otro método tradicionalmente usado e implementado en PC-BC y actualmente en MSBPC es el de encontrar la altura óptima en función del mayor beneficio acumulado por nivel de altura por columna (Diering, 2000). A esta altura se le llama BHOD (*“Best Height of Draw”*), por sus siglas en inglés, representando la mejor altura de extracción en términos económicos.

Existe una tercera metodología utilizada por División El Teniente de CODELCO la cual se basa en el criterio del costo de oportunidad (Lane, 1982) con una implementación para columnas de extracción (De la Huerta, 1994).

### 2.4.1. Metodología *Best Height of Draw*

Como se mencionó anteriormente, la metodología se basa en definir como altura de columna la que obtiene el máximo beneficio acumulado. Los parámetros para definir la altura óptima son los siguientes:

- Costo desarrollo [US\$/m<sup>2</sup>]
- Costo mantención [US\$/m<sup>2</sup>]
- Valoración de bloques [US\$]

Esta metodología no considera interacción entre columnas o puntos de extracción vecinos. Un ejemplo de la valorización acumulada por columna se muestra en la siguiente figura.

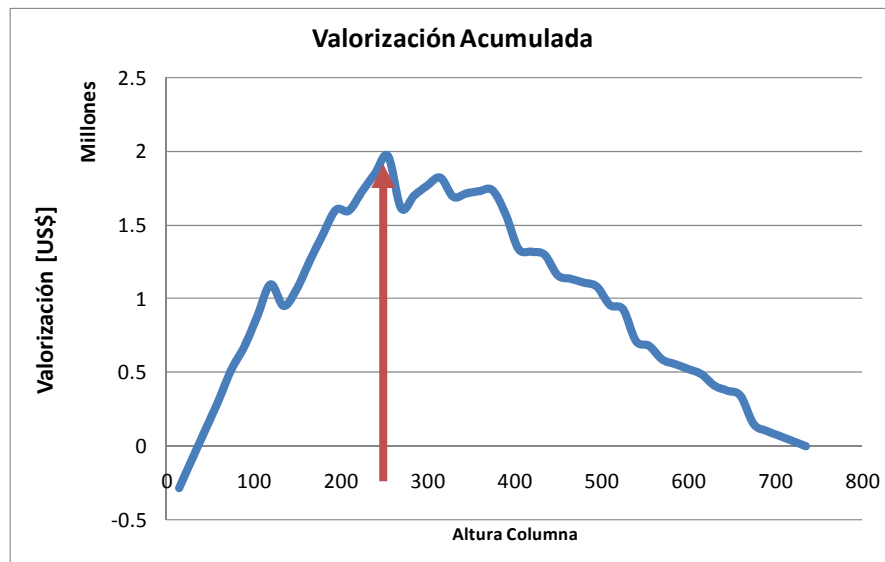


Figura 2.8. Cálculo altura de columna.

Este procedimiento finalmente define como altura de columna el punto correspondiente al máximo beneficio acumulado. Naturalmente la valorización empieza con un valor negativo, considerando el costo de desarrollo del punto de extracción, y luego los quiebres presentados se deben al costo de mantención cada cierta altura. Este es el procedimiento que ocupa MSBPC (Mintec Inc., 2010) para valorizar las columnas y el cual estará dentro del caso de estudio.

#### 2.4.2. Criterio de costo de oportunidad

El criterio de costo de oportunidad fue desarrollado inicialmente por K. Lane, que luego fue implementado para columnas de extracción para block caving para la estimación de reservas extraíbles, incorporando al cálculo la secuencia minera o la estrategia de producción (De la Huerta, 1994).

Este autor intenta responder cuál es el porcentaje óptimo de extracción de un cierto bloque, dado el hecho de que un alto porcentaje de extracción por bloque necesariamente posterga el proceso de extracción de bloques de mineral de mejor ley, y un caso opuesto podría significar un alejamiento del óptimo.

Para poder incorporar el costo alternativo señalado anteriormente, es necesario derivar una expresión que contemple dicha situación. A continuación se presenta la ecuación de beneficio asociada a cada bloque.

$$B = (p \cdot y \cdot g - c - m) \cdot Q - f \cdot t - F \quad [8]$$

Donde:

- p: precio del producto [US\$/ton. Fino]
- y: recuperación metalúrgica [%]
- g: ley media del bloque [%]
- c: costo de procesamiento [US\$/ton]

- m: costo min (variable) [US\$/ton]
- f: costos fijos por período (t) [US\$]
- t: período de tiempo en explotar el bloque [año]
- Q: tonelaje extraíble del bloque [tons]
- F: costo de preparación del bloque [US\$]

Notar que en la ecuación 8, g, Q y t son variables y dependen del porcentaje de extracción de cada bloque.

El objetivo es encontrar el porcentaje de extracción óptimo del bloque, lo que corresponde a una ley de cierre que maximice el valor presente de los beneficios generados por la explotación del yacimiento. Luego de ciertas aproximaciones que se detallan en el trabajo de De la Huerta, se llega a la siguiente expresión que permite calcular dicho valor presente:

$$V = \frac{B + W}{(1 + d \cdot t)} \quad [9]$$

Donde:

- V: Valor presente de los beneficios o VAN del yacimiento.
- B: Beneficio de extraer el bloque.
- W: Valor presente de los beneficios del resto de los bloques (actualizado a fin del período t).
- d: Tasa de descuento.

Luego de un manejo algebraico simple, se llega a la siguiente expresión:

$$V - W = v = B - d \cdot V \cdot t \quad [10]$$

Donde v representa el incremento o disminución en el valor presente debido a la explotación del bloque. Reemplazando esta expresión en la ecuación 9, se obtiene lo siguiente:

$$v = (p \cdot y \cdot g - c - m) \cdot Q - (f + d \cdot V) \cdot t - F \quad [11]$$

Esta última expresión difiere de la primera en el factor  $d \cdot V$ , el cual representa el costo de oportunidad de diferir la extracción de leyes altas cuando se opta por prolongar la vida del bloque, extrayendo leyes bajas. El autor postula que si el valor de la tasa de descuento es nulo, entonces también lo es factor " $d \cdot V \cdot t$ ", y en ese caso la expresión 1, beneficio de explotar el bloque, es igual a la expresión 8, incremento en el valor presente debido a la explotación del bloque. Además, el autor previene los siguientes alcances:

-En dicha expresión aparece V que es desconocido mientras no se determine el porcentaje óptimo de extracción o ley de cierre, para cada uno de los bloques. Para remediar este hecho, se puede utilizar la programación recursiva de tal manera de realizar sucesivas iteraciones partiendo de un valor  $V = 0$ .

-La construcción de la expresión es válida sólo si  $V$  depende de las reservas y no de las variaciones de precios y costos en el tiempo. Es decir, si existen precios variables en el tiempo, entonces el valor de  $V$  dependerá del precio, y se daría el caso en que un mismo volumen de reservas tenga asociado un valor presente variable dependiendo del año que se inicie la explotación. Un análisis que involucre el factor de precios y costos variables en el tiempo es de mucho interés; sin embargo, para propósito del análisis de De la Huerta, se supone precios y costos constantes a lo largo de la vida del depósito.

## 2.5. Secuenciamiento

Durante el desarrollo del trabajo se ha hablado indistintamente de block y panel caving cuando se refiere al método de forma genérica como métodos por hundimiento. En esta sección se pretende estudiar la diferencia sustancial entre la explotación mediante block caving y panel caving. De esta manera se busca diferenciar el método como un proceso del punto de vista del flujo gravitacional. A continuación se muestran las distintas formas en que hoy en día se explotan las minas de block y panel caving (Diering, 2008).

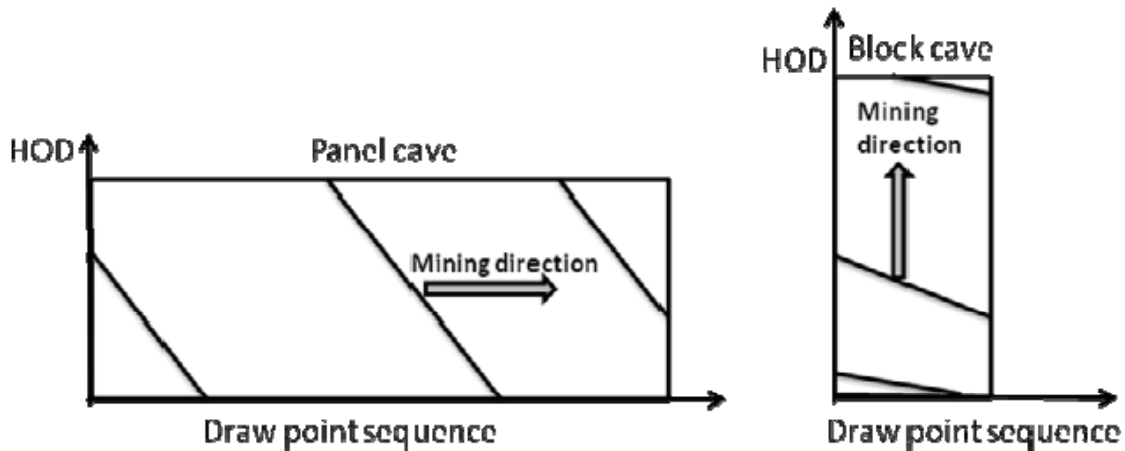


Figura 2.9. Esquema de diferencia entre block y panel caving (Diering, 2008).

Como se aprecia de la figura, el panel caving tiene una dirección de extracción horizontal mientras que el block caving una dirección vertical, generalmente con alturas de columnas mayores que las de panel caving. Por otro lado, la apertura de puntos de extracción para panel caving es de forma continua mientras que para block caving esta ocurre de forma discreta (por bloques). Para ejemplificar de mejor manera las diferencias, tendremos los siguientes parámetros.

- $N$  = Cantidad de nuevos puntos de extracción abiertos por período.
- $A$  = Área de influencia de cada punto de extracción.
- $H$  = Promedio (máxima / económica) altura de columna por puntos de extracción.
- $M$  = Número total de puntos de extracción por layout.
- $D$  = Densidad promedio del material
- $V$  = Tasa de extracción vertical (m/período)
- $R$  = Confiabilidad o disponibilidad de los puntos de extracción

- $V'$  = Tasa de extracción vertical efectiva.
- $T_L$  = Vida de un punto de extracción.
- $T_U$  = Tiempo para la realización del hundimiento.
- $T_M$  = Vida de la mina (años).
- $T_R$  = Tiempo de ramp up para la producción total planificada.
- $T_E$  = Tiempo de finalización (ramp down).
- $T_F$  = Tiempo que la mina está en su máxima producción.
- $P_B$  = Tasa de producción máxima sustentable de block caving.
- $P_P$  = Tasa de producción máxima sustentable de panel caving.
- $N_A$  = Número de puntos de extracción activos en panel caving.

Luego, podemos definir las siguientes ecuaciones.

$$V' = V R \quad [12]$$

$$T_L = H / V' \quad [13]$$

$$T_U = M / N \quad [14]$$

$$T_M = T_U + T_L \quad [15]$$

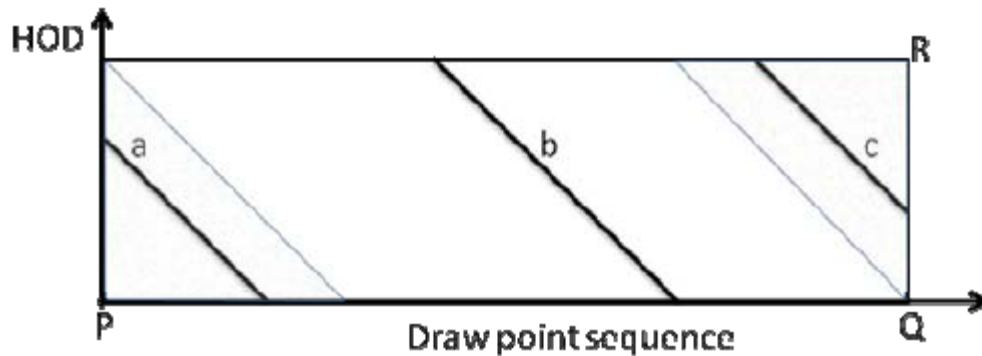


Figura 2.10. Ramp up, estado estacionario y Ramp down. (HOD = Altura de extracción).

Considerando la figura anterior,  $T_L$  es el tiempo que se demora un punto de extracción para moverse entre P y Q,  $T_U$  para moverse entre Q y R. Para Block Caving  $T_L \gg T_U$ . Para Panel caving,  $T_U \gg T_L$ .

Ahora, se considerará la producción máxima según método de explotación. Para block caving, la dirección de extracción es principalmente vertical mientras que se tiene que esperar para que todos los puntos de extracción sean desarrollados en el bloque mientras que para panel caving, la dirección de extracción es principalmente horizontal con nuevos puntos de extracción reemplazando a los agotados de forma continua.

$$P_B = M A D V' \quad [\text{ton/periodo}] \quad [16]$$

$$P_P = N A D H \quad [\text{ton/periodo}] \quad [17]$$

Las diferencias entre las expresiones 16 y 17 son simples. En block caving la tasa de extracción vertical es muy significativa, y es independiente de cuanto se demore el desarrollo de los puntos



de extracción. Para el panel caving ocurre exactamente lo opuesto. La tasa de extracción máxima es independiente de cuantas toneladas se pueden obtener por punto de extracción por día (capacidad de socavación), pero depende fuertemente de cuantos puntos nuevos se pueden incorporar por día. Para incrementar la tasa de extracción vertical en panel caving, Diering postula que sólo se debería considerar una estrategia de corto plazo para aumentar la producción total.

De la ecuación 16 (definida para block caving), se puede deducir el número máximo de puntos de extracción activos para el caso de panel caving.

$$N_A = P_P / (A D V') \quad [18]$$

$$\text{ó } N_A = N H / V' \quad [19]$$

En seguida, se deben considerar los tiempos de ramp up y ramp down ( $T_R$  y  $T_E$ ). En el caso de panel caving, el tiempo de ramp up es equivalente al tiempo hasta que el primer punto de extracción cierre. El tiempo de ramp down también es la vida de un punto de extracción, desde que la producción empieza a decaer, no se pueden abrir nuevos puntos de extracción, por lo que hay que esperar desde ese momento hasta que todos los puntos que están activos empiecen a cerrar de forma sistemática. Por lo tanto,

$$T_R = T_L \quad [20]$$

$$T_E = T_L \quad [21]$$

El ramp up para el block caving es ligeramente diferente, ya que después de que los últimos puntos de extracción son desarrollados, hay un retraso adicional debido a que las tasas de extracción de los nuevos puntos crecen lentamente en un principio. Para block caving,  $T_E \sim 0$  ya que todos los puntos deberían ser cerrados típicamente juntos al final de la vida de la mina. Similarmente, el tiempo en que la extracción llega a su máximo, la ecuación que representa esta expresión está dada por:

$$T_F = T_M - T_R - T_E \quad [22]$$

$$\text{o } T_F = T_U - T_L \text{ (para panel caving)} \quad [23]$$

## 2.6. Conclusiones

De este capítulo se logra entender cómo se realiza el cálculo de reservas en minería de caving, y adicionalmente, las herramientas disponibles con las cuales se generarán los cambios en la metodología de estimación de reservas. En la actualidad, la base para la estimación corresponde a la utilización del modelo de Laubscher para generar un modelo diluido con el cual, dado un modelo económico, se estima la altura de columna para cada punto de extracción. El próximo paso corresponde a operativizar este volumen, esto se realiza con un suavizado del techo de las

columnas considerando las alturas de columnas vecinas. Con este último procedimiento realizado, de forma genérica, se determinan las reservas extraíbles para block o panel caving. En la actualidad, con las herramientas existentes de flujo gravitacional, se puede hacer el proceso de estimación de reservas considerando variables que anteriormente no se podían considerar como por ejemplo, la secuencia de extracción. Del punto 2.5 se puede apreciar las diferencias de la extracción mediante panel y block caving. De esta base se pretende generar una metodología que incorpore la secuencia de extracción utilizando una herramienta de flujo gravitacional (REBOP) y verificar la influencia de esta incorporación en la estimación de reservas.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Los pasos necesarios para el desarrollo del trabajo se dividen en dos partes principales. La primera corresponde a la validación de MSBPC en cuanto a las etapas de planificación de largo plazo y determinar las restricciones asociadas al modelo que se tendrá que utilizar posteriormente con la herramienta de flujo. Por otro lado se deben encontrar las posibilidades de mejora de este software que se encuentra en desarrollo. La segunda es, la evaluación de las secuencias de extracción mediante las simulaciones en REBOP. De las secuencias de REBOP se obtendrán los datos necesarios para estimar un nuevo modelo diluido al cual se le recalculará la altura para cada columna, verificando posibles diferencias en las reservas extraíbles. Un esquema más detallado de la metodología se presenta a continuación.

### 3.1. Validación MSBPC

MSBPC es un software de planificación minera subterránea en block/panel caving que está fundamentado en el modelo volumétrico de mezcla vertical de Laubscher (Mintec Inc., 2010). Adicionalmente, este software utiliza la metodología del máximo beneficio acumulado para la valorización de columnas. Un esquema de los pasos a seguir para la validación de esta herramienta se muestra a continuación.



Figura 3.1. Esquema general de los pasos de estudio para la validación de MSBPC.

Dentro de los alcances del trabajo, se mencionó que no se trabajará con la estimación del nivel de hundimiento, por lo que este paso se asumirá como un parámetro de entrada para el estudio.

El detalle de los pasos para la validación son los siguientes:

1. Verificación e implementación del Modelo de Recursos.
2. Verificación de la correcta ubicación del nivel de hundimiento.
3. Validación del modelo de mezcla comparándolo con el algoritmo de Laubscher.
4. Implementación correcta de la matriz de mezcla en los atributos a diluir.
5. Valoración de bloques por columna.
6. Estimación de altura de columna.
7. Suavizamiento de columnas.
8. Secuenciamiento de extracción.
9. Plan de producción.

Para abordar el problema de la generación del modelo diluido en función de la secuencia de extracción se tiene la siguiente metodología:

1. Establecer un modelo de bloques en el cual se puedan generar las pruebas de simulación con los atributos necesarios para diferenciar secuencias manteniendo fijo los demás parámetros.
2. Implementar el modelo generado en MSBPC y ejecutar todos los pasos de la planificación hasta finalmente llegar a una envolvente económica.
3. Definir distintas secuencias de extracción de Panel y Block Caving para el modelo en MSBPC.
4. Reportar los datos correspondientes a las leyes en altura por columna y tonelaje extraído por periodo, considerando como mecanismo de dilución el modelo de Laubscher (MSBPC).
5. Utilizar las secuencias de extracción generadas por MSBPC para hacer las simulaciones iniciales en REBOP, sin considerar límites para la propagación del hundimiento, tanto horizontal como vertical.
6. Generar simulaciones en REBOP para las mismas secuencias de extracción pero considerando la restricción de que sólo existe una propagación vertical del quiebre, haciendo la analogía al modelo volumétrico de mezcla vertical.
7. Utilizar los reportes de marcadores para establecer una matriz de mezcla en función de las secuencias de extracción.
8. Analizar las diferencias que existan debido a la dilución horizontal mediante el reporte de los marcadores.

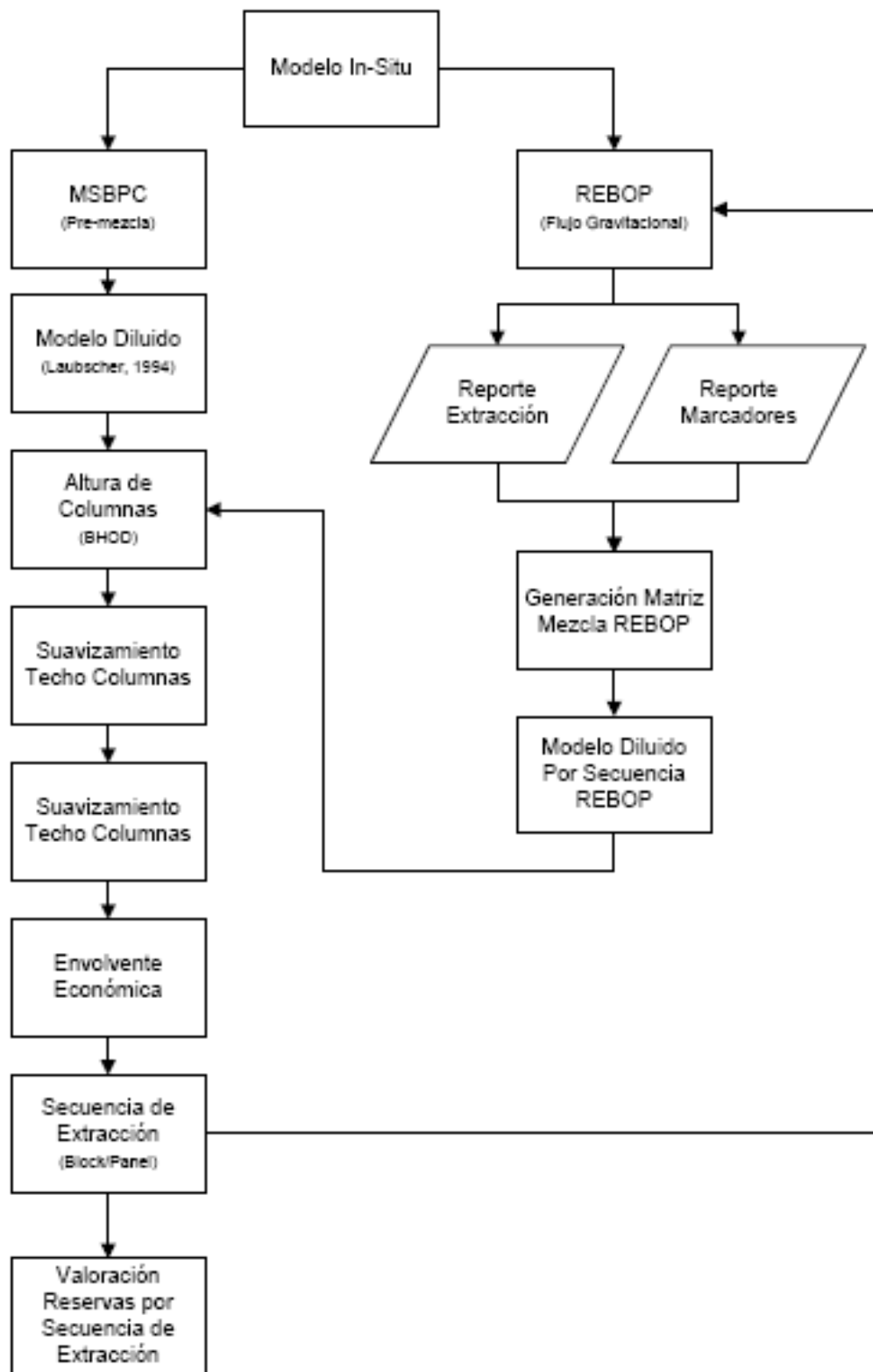


Figura 3.2. Esquema para el proceso de cálculo de reservas en función de secuencias de extracción.

La idea consiste en utilizar MSBPC para estimar alturas de columnas y generar secuenciamientos de extracción. Inicialmente se utiliza el modelo in-situ para diluirlo en MSBPC, luego se genera la envolvente económica a partir de un modelo económico definido inicialmente. El próximo paso corresponde a generar las secuencias de extracción. Las secuencias se ingresan como parámetro inicial a REBOP como el tiraje programado. Cada secuencia es ingresada a REBOP junto con el modelo in-situ ya que en este caso, REBOP es la herramienta encargada de generar la dilución. De los cálculos se obtiene un reporte de extracción por periodo que en este caso se trabajará a escala mensual. Adicionalmente se obtendrá un reporte de marcadores que muestra la posición inicial de cada marcador del modelo, el punto de extracción y el día en el cual fue extraído. De esta forma se puede estimar mediante un algoritmo realizado en Matlab una matriz de mezcla con la cual se genera el modelo diluido que luego se ingresa nuevamente a MSBPC para estimar la nueva envolvente económica. De esta manera se obtendrán reportes de reservas para cada secuencia de extracción.

## CAPÍTULO 4: REVISIÓN DE MSBPC

### 4.1. Resumen

En este capítulo se presenta la revisión de MSBPC, la cual comprende el análisis de todos los procesos que determinan la reservas extraíbles para minas de block y panel caving. La revisión comprende desde la implementación del modelo de recursos hasta la generación de los planes de producción por punto de extracción para una escala de tiempo anual. MSBPC es el software que se utilizará en el estudio para generar las envolventes económicas determinada por un modelo de bloques inicial, un layout de puntos de extracción y un modelo económico. Esta revisión tiene la finalidad de verificar la correcta realización de todos los procesos y las restricciones con las cuales se tiene que trabajar en el estudio.

### 4.2. Modelo de Recursos

El modelo de recursos que se le ingresa a MSBPC corresponde a un modelo que puede incluir al menos 10 atributos, entre los cuales es necesario que contenga al menos un atributo de ley, densidad y hundibilidad, mientras que las dimensiones de los bloques (dx, dy, dz) puede ser variable. Para la validación se utilizó un modelo de bloques de 20x20x15 m. El atributo de ley corresponde a cobre, representada por la variable CU.

La hundibilidad está representada por una variable que tiene valores 0 ó 1. MSPBC relaciona estos valores con la tasa de extracción vertical, considerando como valor 0 a un material menos hundible que el de valor 1, el cual se puede representar como Primario-Secundario para efectos prácticos y que también se somete al proceso de dilución.

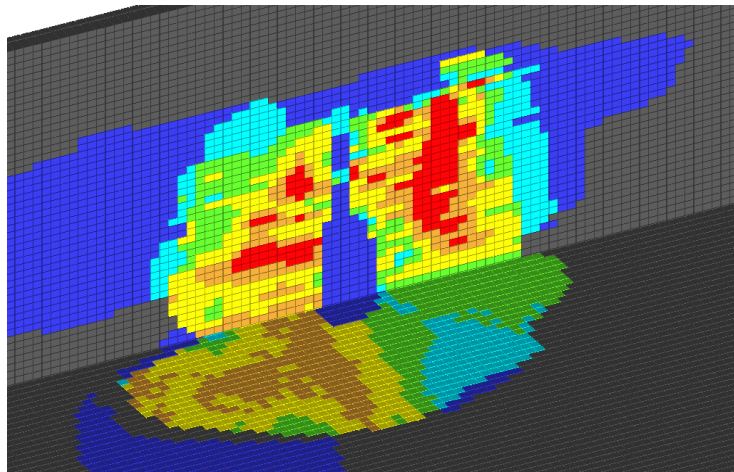


Figura 4.1. Modelo de recursos cargado en MineSight MSBPC.

En cuanto a la validación, se puede afirmar que el modelo se carga correctamente en el software con todos los atributos. Esto se validó mediante la comparación de los valores de los principales

atributos por niveles entre el modelo de bloques y lo que se visualiza en MineSight (Figura anterior). Cabe destacar que MSBPC es un módulo que está montado sobre la plataforma de MineSight 3D. Por lo tanto, cuando se habla de MineSight, se refiere a la plataforma de visualización de MSBPC.

### **4.3. Modelo de mezcla en MSBPC**

Para la validación del modelo de mezcla de MSBPC se implementó el modelo volumétrico de Laubscher mediante el software Matlab para computar los ejemplos de columnas y verificar si el proceso de mezcla vertical se hace de manera correcta en MSBPC. Para esto, se tomaron diferentes puntos de entrada de dilución para comparar las matrices y los cálculos de los materiales diluidos.

El primer paso fue validar el modelo realizado en Matlab con un ejemplo de columna de altura inferior a la realización en MSBPC. Los gráficos de mezcla se muestran a continuación en función del punto de entrada de dilución. El estudio se hizo inicialmente para una columna y 5 puntos de entrada de dilución con la finalidad de verificar la correcta implementación del modelo de Laubscher en Matlab. A continuación se muestra gráficamente (desde la figura 4.2 a la figura 4.6) modelos de ejemplo para la validación del modelo implementado en Matlab. Se considera una columna de 20x20 metros de área y secciones de 20 metros de altura, como lo representan las líneas rojas de la figura. Las líneas azules representan las líneas de dilución según el modelo de Laubscher para distintos puntos de entrada de dilución (20%, 40%, 50%, 60% y 80% respectivamente).



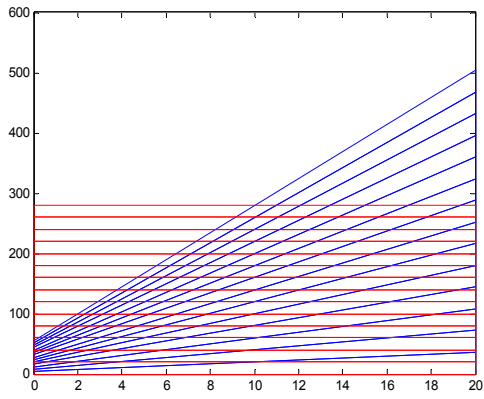


Figura 4.2. PED 20%.

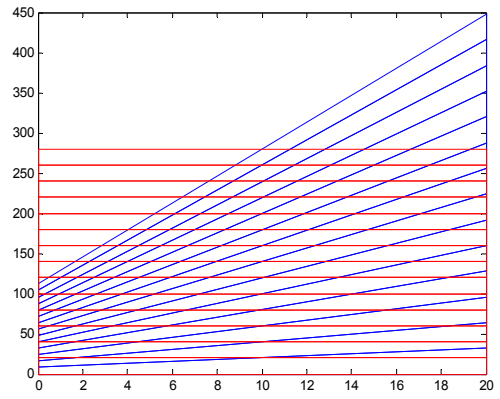


Figura 4.3. PED 40%.

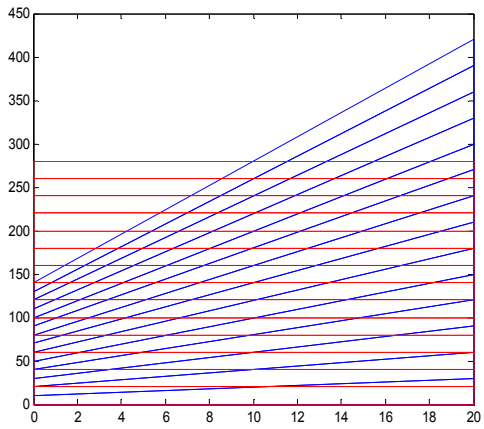


Figura 4.4. PED 50%.

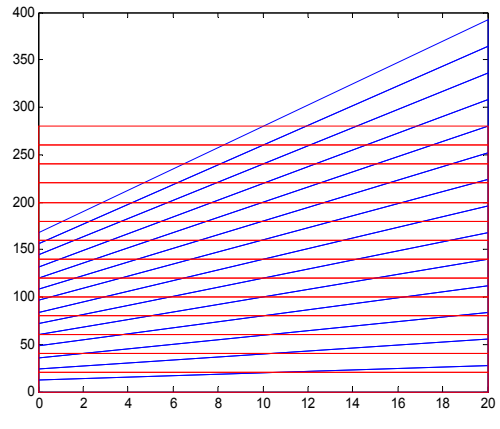


Figura 4.5. PED 60%.

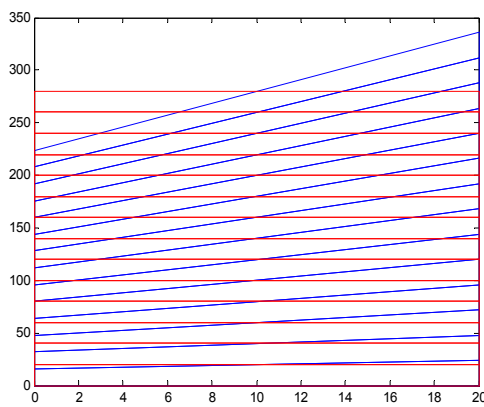


Figura 4.6. PED 80%.

La próxima figura muestra el resumen de las leyes en altura en función del punto de entrada de dilución. Los puntos azules representan las leyes in-situ en función de la altura de la columna. Las líneas representan las curvas de dilución generadas por el modelo de Laubscher. De estas se puede apreciar el suavizamiento generado al pasar de leyes altas (0.7%) a sectores con ley 0%. A medida que entra de forma más temprana la dilución, más suave es el cambio en las leyes. Naturalmente, si la dilución entra tarde, como el caso de PED 80%, el cambio en ley, es más pronunciado.

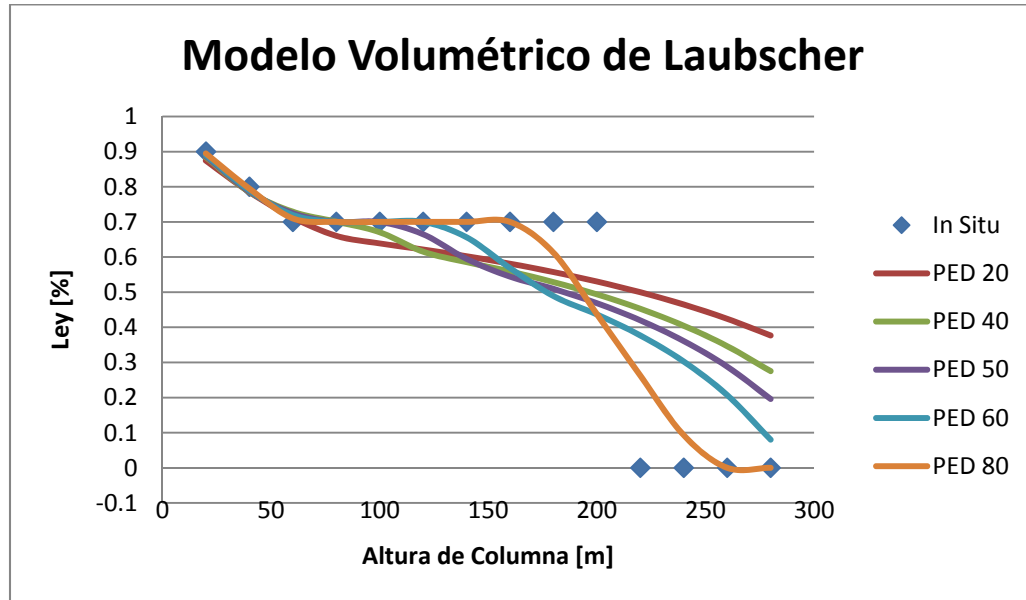


Figura 4.7. Curvas de dilución para el ejemplo propuesto.

Luego de verificar la correcta implementación del algoritmo, se procedió a calcular las mezclas en Matlab para el modelo de bloques en estudio.

El procedimiento para la comparación de las matrices de mezclas generadas por el mecanismo anteriormente descrito, corresponde a obtener los resultados de una columna de extracción cualquiera, en este caso, a la columna de la fila 64, columna 91 del modelo de bloques “MSOP” entregado por Mintec (Mintec Inc., 2010). El nivel de hundimiento corresponde al nivel 49 del modelo en cuestión.

El cálculo se realizó en MSBPC para 3 puntos de entrada de dilución; 40, 60 y 80%. Este proceso se repitió de forma sistemática para 10 columnas de distintas zonas del yacimiento calculando las variables diluidas del modelo. En el caso de las figuras que se muestran a continuación se trata del ejemplo descrito en el párrafo anterior. También se efectuaron pruebas para otras variables como densidad (en el caso de densidad variable), tipo de roca y hundibilidad.

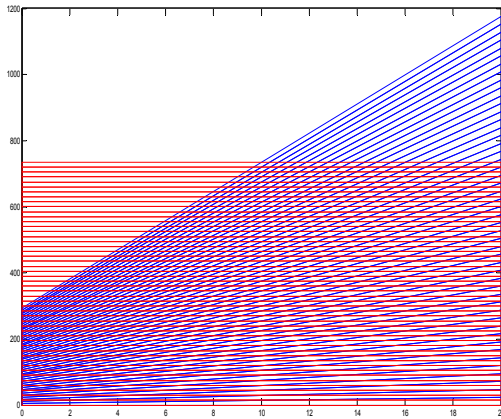


Figura 4.8. Modelo MSOP, PED 40%.

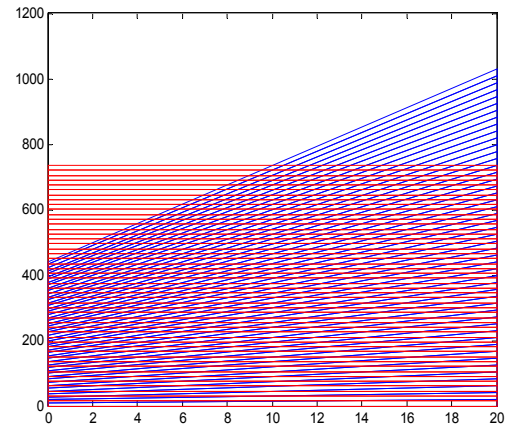


Figura 4.9. Modelo MSOP, PED 60%.

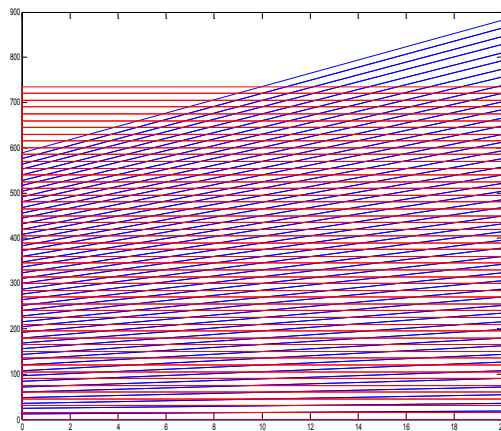


Figura 4.10. Modelo MSOP, PED 80%.

Una manera simple de visualizar la matriz de mezcla corresponde a utilizar estos gráficos que representan la altura de la columna en estudio (en líneas rojas). En este caso, la columna queda determinada por las dimensiones del modelo de bloques. El ancho de las columnas es de 20 metros y la altura de los bloques es de 15 metros, estas dimensiones definirán la mezcla de cada columna. El gráfico representa con líneas rojas los diferentes niveles (o bloques) de la columna in-situ mientras que en azul se muestra las curvas de dilución dadas para cada PED específicos.

Los resultados obtenidos en la comparación son, en términos de error relativo, menores a 0,2% en todos los bloques donde se produce mezcla, lo que se puede atribuir simplemente a errores en la aproximación de las áreas. Este procedimiento se realizó para los 3 puntos de entrada de dilución, arrojando resultados prácticamente iguales para la comparación mediante error relativo. En la mayoría de los casos el error no excede el 0,01%, por lo que se concluye que el procedimiento de la mezcla mediante el modelo de Laubscher, MSBPC lo hace de manera correcta. Cabe destacar que si bien los resultados arrojados corresponden a la columna referente a la fila 64, columna 91

y nivel 49 del modelo de bloques, también se realizaron corridas para otras columnas del modelo, arrojando resultados equivalentes en términos de error.

La última etapa dentro del proceso de validación del modelo de mezcla corresponde a verificar el cálculo de leyes diluidas. Si bien es un proceso simple donde se multiplica la matriz de mezcla por el vector de leyes in-situ, es de suma importancia verificar si el proceso lo hace de manera correcta ya que involucra el cálculo de leyes y densidad para el modelo final de reservas.

Para el mismo ejemplo mostrado anteriormente, se muestran los gráficos de las leyes en altura, considerando la implementación de Laubscher en Matlab (verde) y MSBPC (morado).

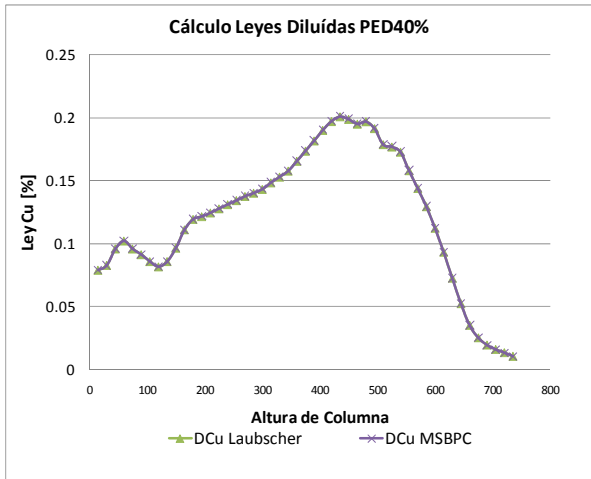


Figura 4.11. Comparación leyes en altura [m], PED 40%.

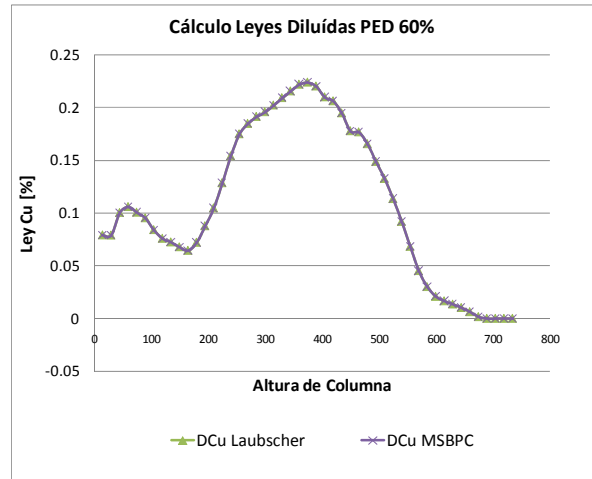


Figura 4.12. Comparación leyes en altura [m], PED 60%.

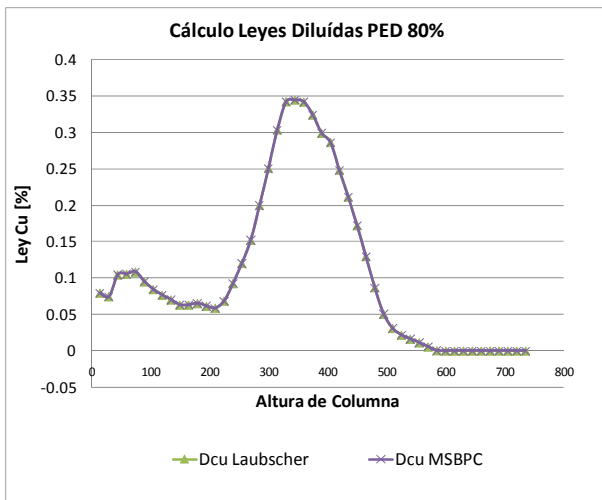


Figura 4.13. Comparación leyes en altura [m], PED 80%.

Gráficamente se aprecia un resultado prácticamente igual en términos de leyes diluidas con respecto al modelo de Laubscher. Al realizar un análisis cuantitativo en cuanto a errores relativos y cuadráticos medios se obtienen los siguientes resultados.

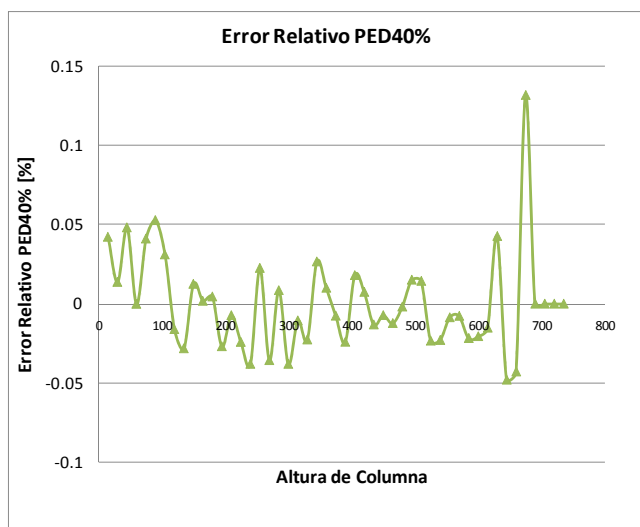


Figura 4.14. Error Relativo PED 40%.

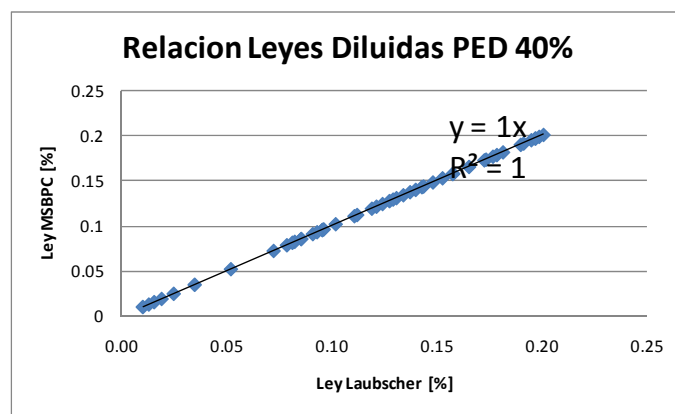


Figura 4.15. Relación de leyes, PED 40%.

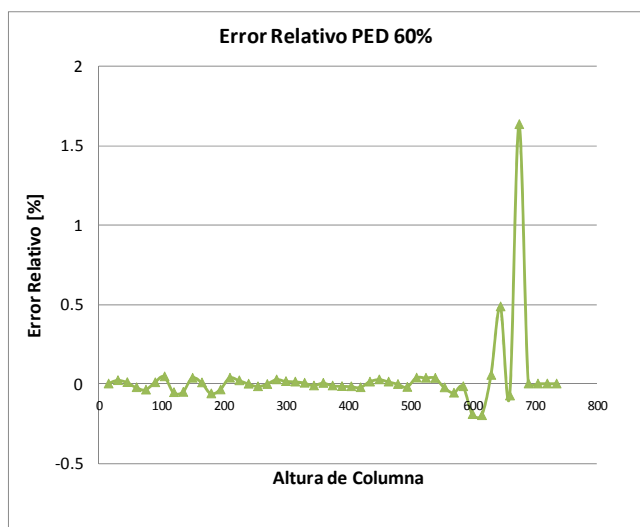


Figura 4.16. Error Relativo, PED 60%.

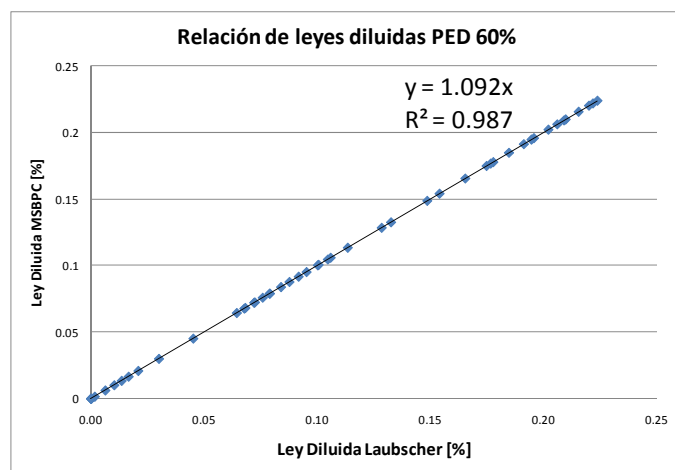


Figura 4.17. Relación de leyes, PED 60%.

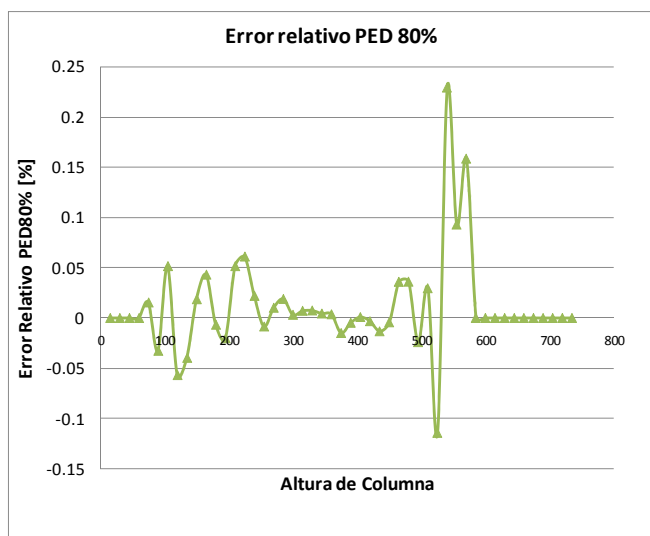


Figura 4.18. Error Relativo, PED 80%.

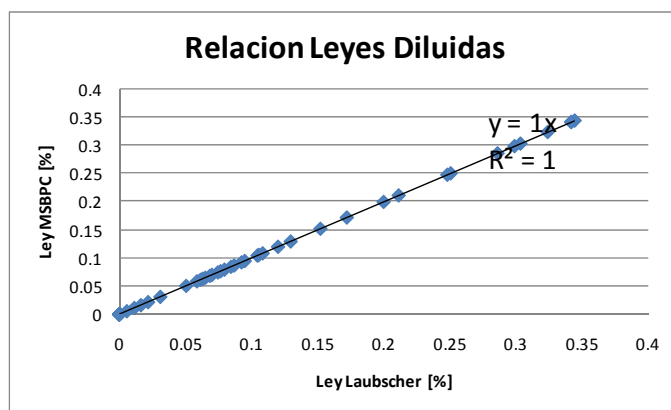


Figura 4.19. Relación de leyes, PED 80%.

Finalmente, se tiene la tabla resumen del error cuadrático medio por punto de entrada de dilución.

Tabla 4.1. Resumen Error Cuadrático Medio.

Error medio	PED 40%	PED 60%	PED 80%
RMSE	3.0184E-05	2.1299E-05	2.8444E-05

Según este procedimiento, el caso de MSBPC tiende a ser levemente distinto con una sobreestimación de las leyes que no debería ser significativo para el cálculo de finos. Los errores arrojados por RMSE dan cuenta de un posible error de aproximación. Este proceso se ejecutó adicionalmente sobre otras variables de leyes y de densidad arrojando resultados equivalentes. El manual del software (Mintec Inc., 2010), no hace referencia a alguna especificación distinta sobre el cálculo de las leyes diluidas por lo que se concluye que el cálculo de leyes se hace de manera correcta.

#### 4.4. Valoración de bloques en MSBPC

Esta sección es relevante para la planificación minera ya que la envolvente económica del yacimiento está determinada por el modelo económico y por cómo MSBPC valoriza los bloques para determinar el mejor sector de explotación. A MSBPC se le ingresa el siguiente modelo económico.

Tabla 4.2. Modelo Económico ingresado a MSBPC.

Modelo Económico MSBPC	
Recuperación metalúrgica	[%]
Costo de procesamiento	[\$/ton]
Ley de concentrado	[%]
Humedad del concentrado	[%]
Costo flete	[\$/ton]
Costo fundición	[\$/ton]
Precio metal	[\$/unidades]
Descuento fundición	[\$/unidades]
Pagable	[%]
Costo refinación	[\$/unidades]
Royalty	[%]

Los valores “*unidades*” representan las unidades en las que se encuentra el metal, como [%] en el caso del cobre y [gr/ton] en el caso del oro, entre otras.

A continuación se muestran las fórmulas necesarias para la valoración de bloques en MSBPC (Mintec Inc., 2010).

```

cnsr (grade#, c#)

c1 concentrate tons      per ton of ore      (v1/100 * g ) / v5
c2 concentrate ton      adjusted for moisture c1 * 1. / (( 100-v7)*.01)
c3 F & S charges        c2 * ( v8 + v9)
c4 metal contained in concentrate per ton of ore in grade units g * (v1/100)
c5 metal contained in con per ton of ore in units c5 ( congtp(v2,v10) * conupt(v2) )
c6 payable units        c5 * v14/100
c7 smelter deduction    units per ton of ore v12 * c1
c8 net payable units    c6-c7
c9 gross value per ore ton c8 * c11
c10 less smlt deduction $ c8 * v12
c11 less refining cost   v15 * c8
c12 Net value before royalty c9-c10-c11
c13 Royalty per ton     c12 * v16 /100
c14 NSR per ton         c12-c13
c15 NSR after process cost per ton c14-v4
    
```

Figura 4.20. Listado de ecuaciones para la valoración de bloques en MSBPC (Mintec Inc., 2010).

La última ecuación mostrada en la figura anterior representa el valor [US\$/ton] que representa la valorización de cada bloque. Desarrollando las expresiones, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\text{Val/ton} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ton}} \right] = \left( g_{cu}[\%] \cdot \frac{RM[\%]}{100} \cdot 22,0462 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right] \cdot \frac{\%payable[\%]}{100} - \frac{\left( \frac{RM[\%]}{100} \cdot g_{cu}[\%] \right)}{g_{concl}[\%]} \cdot \text{smlt\_deduction} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] \right) \cdot \left( P_{cu} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] - \text{smlt\_deduction} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] - \text{Refcost} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] \cdot 1 - \text{royalty}[\%] \cdot 100 - \text{Processingcost} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ton}} \right] \right) \quad [24]$$

La ecuación anterior no es una expresión simple de entender para utilizarla como herramienta para valorizar bloques. Es por este motivo que se propone una nueva forma de valorizar los bloques como una fórmula estándar. Los parámetros a utilizar en la fórmula son los siguientes.

-  $g_{met}$ : Ley del Metal [%]

- RM: Recuperación metalúrgica [%]
- $g_{conc}$ : Ley del metal en el concentrado [%]
- $P_{met}$ : Precio del metal  $\left[\frac{US\$}{units}\right]$ . En este caso:  $\left[\frac{US\$}{lb}\right]$
- $f$ : Factor de conversión de unidades  $\left[\frac{units}{tons}\right]$ . En este caso: 2204.62  $\left[\frac{lb}{tons}\right]$ .
- TC: Costo de procesamiento  $\left[\frac{US\$}{conc.tons}\right]$
- RC: Costo de refinación  $\left[\frac{US\$}{units}\right]$ . En este caso:  $\left[\frac{US\$}{lb}\right]$
- FC: Costo flete  $\left[\frac{US\$}{conc.tons}\right]$

Por lo tanto,

- Ley de concentrado en el mineral:  $\left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] [\%]$
- Beneficio Base:  $\left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] \cdot P_{met} \cdot \left(\frac{2204.6}{100}\right) \cdot (g_{conc} - deduction)$   $\left[\frac{US\$}{tons}\right]$
- Costo Tratamiento:  $\left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] \cdot TC$   $\left[\frac{US\$}{tons}\right]$
- Costo Refinación:  $\left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] \cdot RF \cdot g_{conc} \cdot 22.046$   $\left[\frac{US\$}{tons}\right]$
- Costo Flete:  $\left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] \cdot FC$   $\left[\frac{US\$}{tons}\right]$

Finalmente, el valor de cada bloque expresado en  $\left[\frac{US\$}{ton}\right]$  es:

$$RevFac = \left[\frac{g_{met} \frac{RM}{100}}{g_{conc}}\right] \left[ P_{met} \cdot \left(\frac{2204.6}{100}\right) \cdot (g_{conc} - deduction) - TC - RC \cdot g_{conc} \cdot \left(\frac{2204.6}{100}\right) - FC \right] \left[\frac{US\$}{ton}\right] [25]$$

Este método se prefiere en la mayoría de los paquetes de planificación en block caving y se recomienda implementarlo en MSBPC.

Para comparar las diferencias de los métodos de valorización entre MSBPC y el propuesto, se tienen los siguientes parámetros de entrada en el modelo económico, considerando cobre como el metal en estudio.



Tabla 4.3. Parámetros económicos de entrada.

Parámetros Económicos de entrada en MSBPC		
Recuperación metalúrgica	80	[%]
Costo de procesamiento	5	[\$/ton]
Costo mina	2	[\$/ton]
Ley de concentrado	26	[%]
Humedad del concentrado	2	[%]
Costo flete	12	[\$/Cton]
Costo fundición	75	[\$/Cton]
Precio metal	1.2	[\$/lb]
Descuento fundición	0.1	[\$/lb]
Pagable	97	[%]
Costo refinación	0.04	[\$/lb]
Royalty	0	[%]

A continuación se muestra una tabla que muestra la comparación entre la metodología para valorización de MSBPC y la real.

Tabla 4.4. Comparación de valorización entre MSBPC y propuesta.

Ley Cu	Val MSBPC	Val real Fórmula anterior	Error
[%]	[US\$/ton]	[US\$/ton]	[US\$/ton]
0.99	10.95	9.8	1.15
1.15	13.85	12.51	1.34
1.14	13.67	12.34	1.33
1.14	13.67	12.34	1.33
1.21	14.94	13.53	1.41
1.25	15.66	14.21	1.45
1.26	15.85	14.38	1.47
1.28	16.21	14.72	1.49
1.3	16.57	15.06	1.51

De la tabla se aprecia que MSBPC sobrestima la valorización de bloques en comparación con el valor propuesto por lo que se recomienda considerar la valorización propuesta para los próximos estudios.

#### 4.5. Columnas de extracción en MSBPC

MSBPC limita el área de influencia de cada columna por los bloques del modelo de bloques. Es decir, no se pueden generar mallas de extracción que no sean cuadradas cuyo espaciado será el que determina las dimensiones de los bloques del modelo.

El criterio de estimación de la altura económicamente óptima (altura de extracción o HOD) corresponde a la metodología de “*Best Height of Draw*”. Este calcula la altura de extracción como la altura que retorne el mayor beneficio acumulado. Los parámetros que definen la altura óptima son:

- Costo de Desarrollo [US\$/m<sup>2</sup>]
- Costo de Mantenimiento [US\$/m<sup>2</sup>]
- Valoración de bloques [US\$/ton]

Un ejemplo de la forma en que MSBPC determina el valor acumulado de cada columna se muestra a continuación.

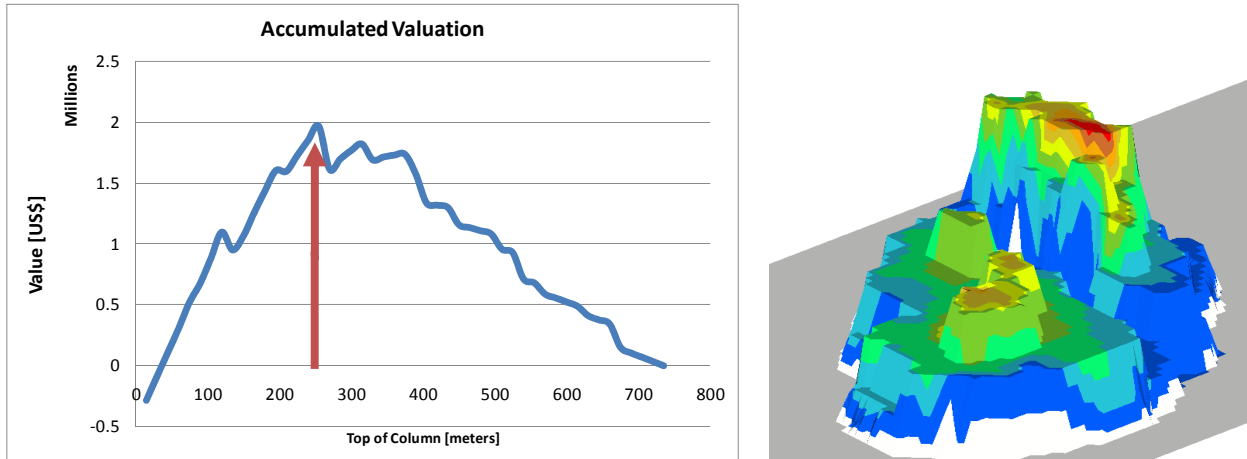


Figura 4.21. Izquierda: Cálculo de valorización acumulada. Derecha: Visualización de HOD en MineSight MSBPC.

Durante el procedimiento para el cálculo de HOD no existe una restricción sobre la altura máxima factible. Es por esto que se recomienda para MSBPC que integre la restricción de altura máxima de extracción como restricción geomecánica. Finalmente, se concluye que el procedimiento para estimar HOD lo hace de manera correcta de acuerdo al criterio establecido.

Como se vió en el capítulo de antecedentes, existe otro criterio para la estimación de HOD, sin embargo, dado el enfoque de las simulaciones, se define una tasa de extracción fija dada por la mina por lo que no existiría el costo de oportunidad asociado a la extracción. (De la Huerta, 1994). Por esta razón, las columnas se valorizarán de acuerdo a la metodología de BHOD, como lo genera MineSight MSBPC.

#### 4.6. Suavizamiento de columnas

El suavizamiento es el último paso dentro del proceso de estimación de reservas que se ejecuta luego de calcular HOD con el fin de obtener una envolvente económica operativizada. El procedimiento de MSBPC define tres opciones para el suavizamiento.

- Maximización de Mineral
- Minimización de Estéril

- Intermedio

La creación de la superficie se restringe principalmente por el gradiente máximo admisible para la superficie. La próxima figura muestra la ventana en la cual se le ingresan los parámetros de entrada en MSBPC.

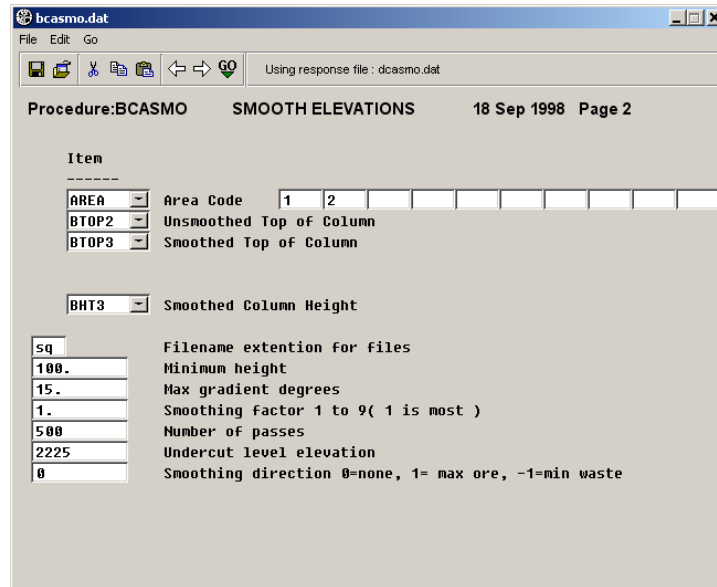


Figura 4.22. Ventana del procedimiento de suavizado en MSBPC.

De la figura se aprecia lo mencionado con respecto a la estrategia para definir las reservas (última variable de la ventana) en la cual se precisa el criterio como maximización de mineral, minimización de estéril o intermedio.

El primer criterio tal como lo dice su nombre intenta maximizar la cantidad de mineral para la envolvente económica, esto lo realiza generando un manto sobre el techo de las columnas más altas influyendo en el aumento de la cantidad de dilución que entra por las columnas vecinas más bajas.

El segundo criterio intenta minimizar la cantidad de estéril generando una superficie privilegiando las columnas más bajas lo que genera un castigo sobre las columnas más altas ya que estas se verán truncadas para no extraer una mayor cantidad de estéril.

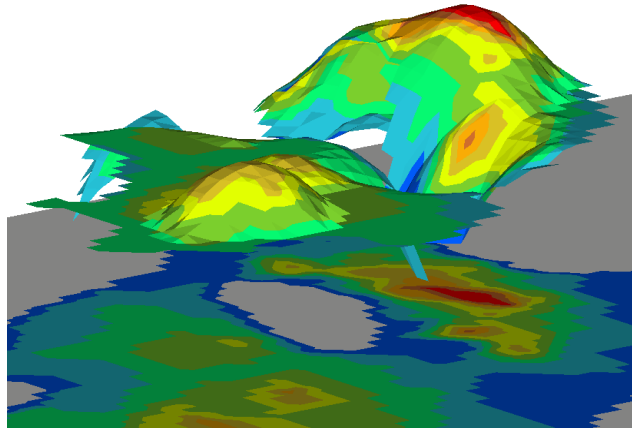


Figura 4.23. Suavizamiento en MineSight MSBPC (minimizar estéril).

Los parámetros definidos para el procedimiento son principalmente variables geométricas que consideran una altura de columna mínima, un gradiente máximo para el techo de columnas y un factor de suavizamiento.

Para la validación de esta etapa se realizó el estudio utilizando diferentes factores de suavizamiento y los tres criterios (*max ore*, *min waste* e *inter*). De los resultados se aprecia que los techos de columnas cumplen con las especificaciones de los criterios, sin embargo, no hay claridad sobre la cubicación de la envolvente económica determinada luego del proceso de suavizamiento.

De la figura siguiente se aprecia el ejemplo de una columna cuya altura inicial (antes del proceso de suavizado), luego la altura utilizando el criterio Maximización de Mineral, después de minimización de estéril y finalmente el criterio intermedio. De los tres criterios se observa que las alturas corresponden a valores no enteros del modelo de bloques (definido por las líneas horizontales cada 15 metros). Para el proceso de cubicación de reservas una vez definida la altura de columna, MSBPC no explicita si se ocupa el bloque entero considerando la nueva altura o si crea una variable nueva del tipo Topografía (considerando una superficie de intersección) del modelo de bloques verificando qué porcentaje de la columna se encuentra en el último bloque.

Es por esta razón que para el futuro análisis de envolventes económicas, se trabajarán con columnas en las cuales las alturas de columnas sean constantes.

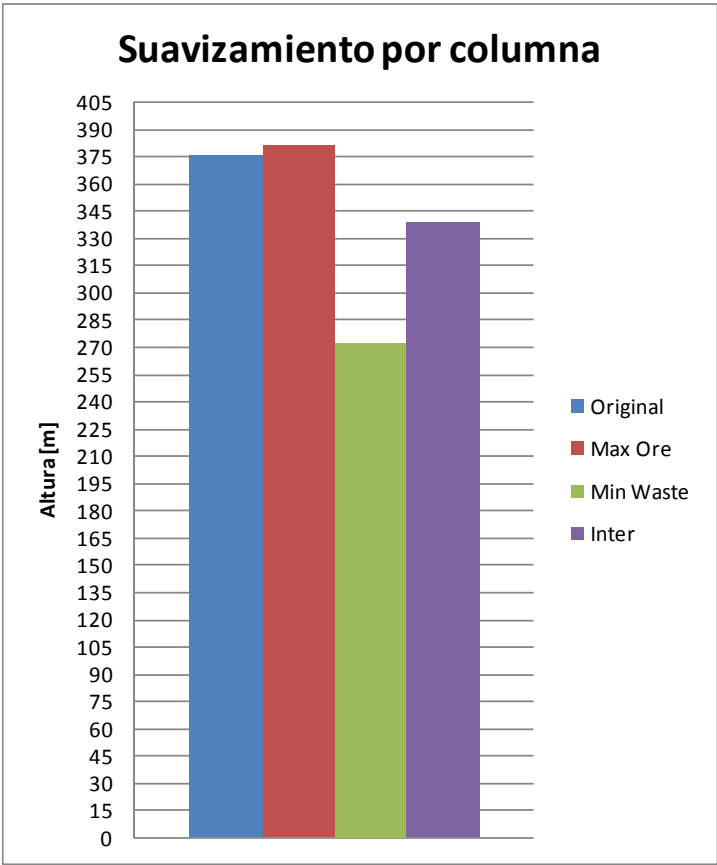


Figura 4.24. Ejemplo de alturas de columnas utilizando los 3 tres criterios.

**4.7. Secuenciamiento en MSBPC**

De acuerdo a la revisión realizada, el secuenciamiento de MSBPC se basa en la identificación de bloques según una dirección de extracción fija con un avance de forma normal a la azimuth de avance en extracción como se muestra en el siguiente ejemplo.

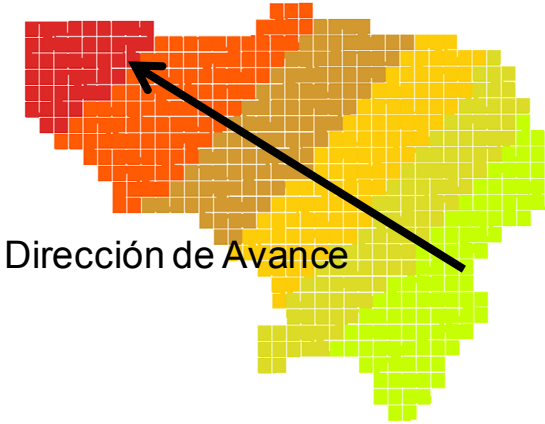
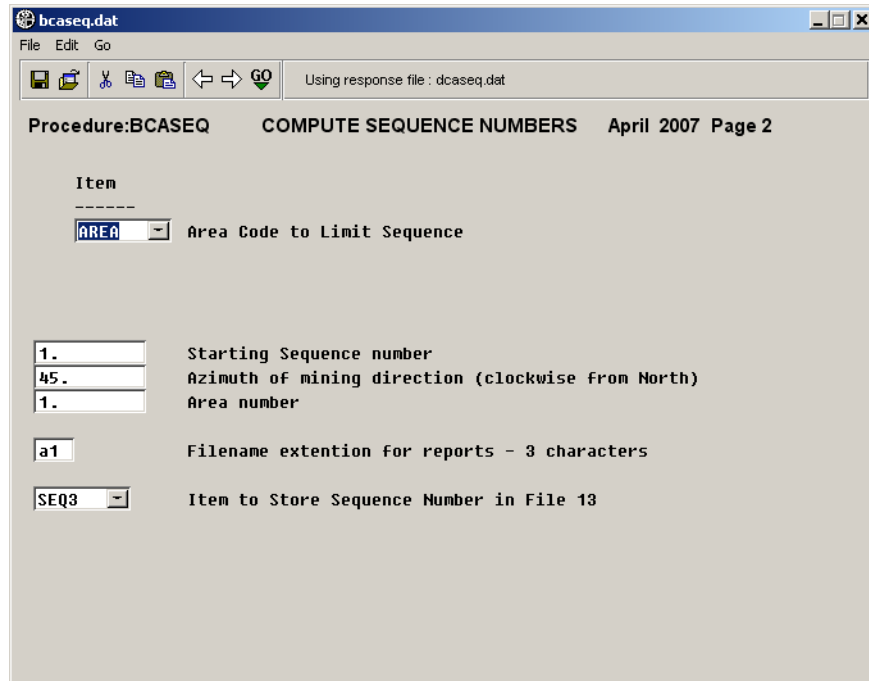


Figura 4.25. Ejemplo de secuenciamiento en MSBPC.

Los colores representan el periodo de extracción de los bloques comandando desde la zona verde hasta terminar la secuencia en el sector rojo, representando una secuencia convencional de Panel Caving. Como se aprecia en la siguiente figura, el parámetro para generar la secuencia de extracción es sólo la azimut de la dirección de avance.



The screenshot shows a software window titled "bcaseq.dat" with a menu bar (File, Edit, Go) and a toolbar. The main area displays the following parameters:

- Procedure:** BCASEQ    **COMPUTE SEQUENCE NUMBERS**    April 2007 Page 2
- Item**  
-----  
 Area Code to Limit Sequence
- Starting Sequence number
- Azimuth of mining direction (clockwise from North)
- Area number
- Filename extension for reports - 3 characters
- Item to Store Sequence Number in File 13

Figura 4.26. Parámetros para generar secuencia de extracción

Si bien el procedimiento, de acuerdo a los parámetros que definen la secuencia, está hecho de manera correcta, se recomienda implementar nuevas variables para definir la forma del avance. MSBPC genera la secuencia siempre de forma recta, normal a la dirección de avance (mostrado en la Figura 4.25. Ejemplo de secuenciamiento en MSBPC.). Se propone implementar un ángulo de avance en la secuencia de extracción que lo defina el usuario. Esta modificación es necesaria ya que por condiciones geomecánicas los frentes se determinan con un cierto ángulo (dependiendo de la dirección de los esfuerzos horizontales). El ejemplo de lo anterior se ejemplifica en la siguiente figura. (Brown, 2003).

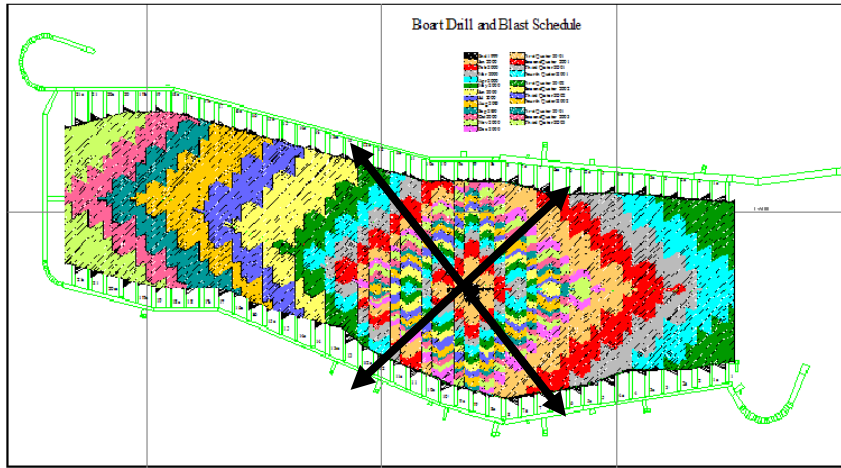


Figura 4.27. Forma del frente de hundimiento representado en secuencia (Brown, 2003)

Lo anterior viene dado por la configuración de los esfuerzos horizontales, como lo muestra la siguiente figura.

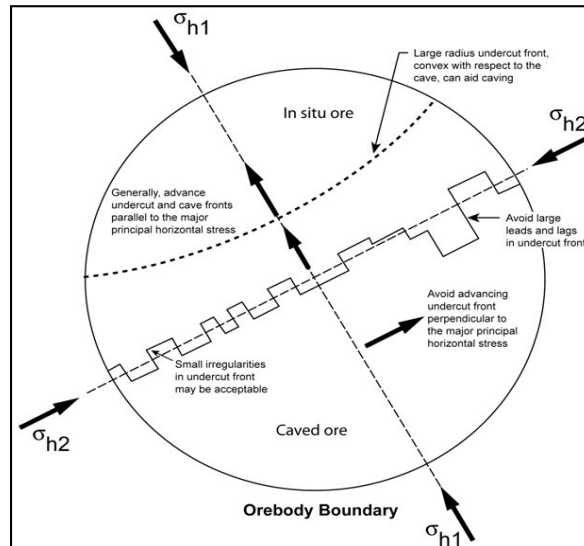


Figura 4.28. Forma del frente de avance en función de los esfuerzos horizontales

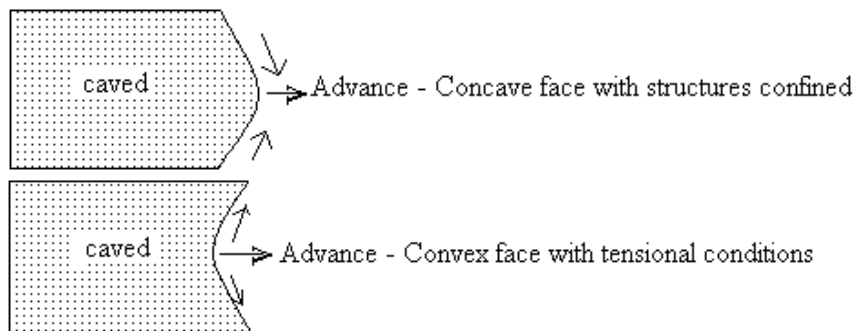


Figura 4.29. Avance del frente cóncavo (Brown, 2003)

De la figura anterior se aprecia que en el caso cóncavo se produce confinamiento mientras que en caso convexo se produce desconfinamiento tanto en el caveback como en los pilares del nivel de hundimiento. Es por esto que se plantea la relevancia de incorporar una forma del frente de avance con una geometría que el usuario pueda modificar de acuerdo a lo presentado anteriormente.

Se concluye que el proceso de secuencia MSBPC lo hace de forma correcta de acuerdo a los parámetros entregados, sin embargo, se propone agregar un parámetro como ángulo de avance en la frente de hundimiento.

#### 4.8. Plan de producción en MSBPC

En MSBPC, el plan de producción es calculado usando los siguientes parámetros:

- Modelo Diluido y sus reservas asociadas
- Secuencia (orden de apertura de puntos de extracción)
- Tasa de Extracción
- Nivel de Hundimiento

Adicionalmente, el plan de producción considera los siguientes parámetros.

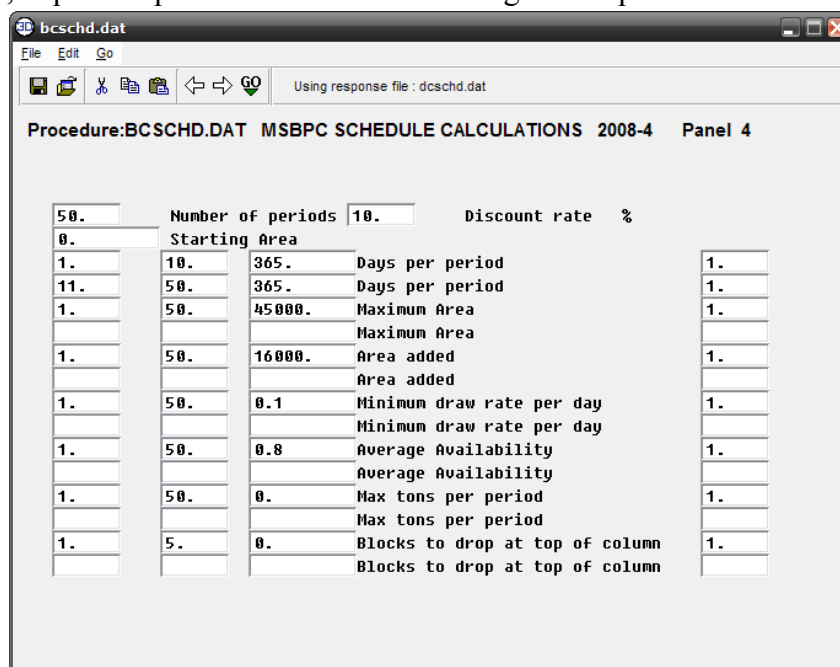


Figura 4.30. Parámetros para el cálculo del plan de producción.

Finalmente, MSBPC reporta las siguientes variables.

- Toneladas por periodo
- Beneficio por periodo
- Área abierta por periodo
- Área cerrada por periodo
- Tasa de extracción vertical por periodo



- VAN por periodo
- Costo de Desarrollo y Mantenimiento por periodo

Un ejemplo de los planes de producción generados por MSBPC se muestran en a continuación.

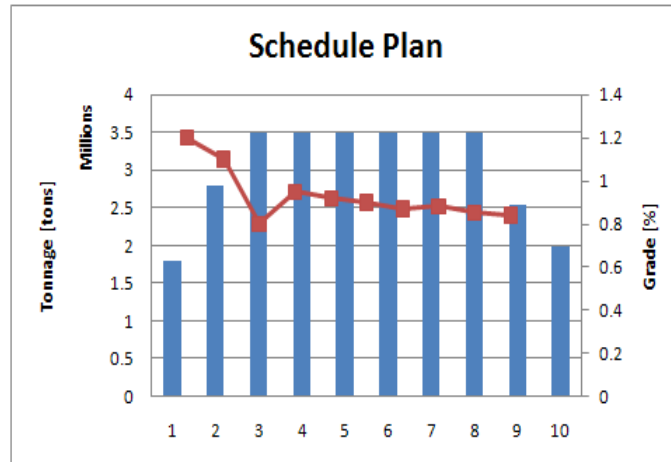


Figura 4.31. Plan de producción en MSBPC.

Del análisis realizado para los planes de producción, se puede concluir que estos obtienen resultados acordes a las restricciones entregadas inicialmente para la planificación del plan de producción. Se observa en los gráficos asociados la tendencia de generar un Ramp Up, un régimen de acuerdo a las reservas disponibles y a la tasa de extracción y luego un Ramp Dawn. Con respecto a la planificación de los desarrollos, MSBPC tiende a sobrestimar cerca de un 10% la capacidad de apertura de área.

Con respecto a la definición de la tasa de extracción, las unidades de entrada para MSBPC corresponden a [m/día]. El programa tiene la posibilidad de variar la tasa de extracción en función del parámetro de hundibilidad representado por las 4 columnas, mientras que las filas corresponden a la profundidad expresada en metros. Es aquí donde existe un problema dado que en general, para definir la curva de tasa de extracción, se hace en función del porcentaje de extracción de columna sólida debido a la variabilidad de alturas. Lo anterior hace referencia a que, por ejemplo, el 30% de una columna de 300 metros es distinto al 30% de extracción de una columna de 100 metros. Esto en MSBPC no se puede representar dado que sólo se define la tasa de extracción por los metros de profundidad, como lo muestra la siguiente figura.

Depth	0.	0.5	0.75	1.00000
0.	0.4	0.65	0.65	0.65
20.	0.4	0.65	0.65	0.65
50.	0.45	0.65	0.65	0.65
100.	0.45	0.65	0.65	0.75
200.	0.5	0.7	0.7	0.7
300.	0.5	0.65	0.65	0.7
400.	0.65	0.7	0.7	0.7
600.	0.7	0.7	0.7	0.8
800.	0.7	0.7	0.7	0.7
900.	0.7	0.7	0.7	0.7

Figura 4.32. Parámetros de entrada para la tasa de extracción en MSBPC.

#### 4.9. Conclusiones

De los puntos analizados para el proceso de planificación minera de block/panel caving, se puede desprender lo siguiente:

- a) El modelo de mezcla de MSBPC está implementado de forma correcta, considerando la utilización del modelo de Heslop-Laubscher 1982. Se recomienda analizar la posibilidad de implementar un modelo de mezcla horizontal.

- b) La matriz de dilución entregada presenta errores muy menores, en ocasiones excepcionales llegan al 2% en error relativo.
- c) El cálculo de los materiales diluidos (leyes, densidades, tipos de rocas) están bien calculados. Errores ínfimos se presumen debido a las aproximaciones (menores a 0.5% de error relativo) por lo que se deduce que el procedimiento está correcto.
- d) Los bloques se valorizan de acuerdo a la metodología estándar del factor de beneficio (RF) dado un modelo económico. La fórmula utilizada no es la que se utiliza normalmente, por lo que se propone la utilización de la ecuación real.
- e) El cálculo altura de columna se realiza mediante metodología estándar del máximo beneficio acumulado, la implementación está correcta.
- f) En cuanto al suavizamiento se concluye lo siguiente:
  - El cálculo del suavizamiento de acuerdo a los 3 criterios lo hace en forma correcta.
  - El reporte del procedimiento no muestra la cantidad de reservas totales (ton@%ley).
  - No explicita cómo se evalúan los bloques que tienen un porcentaje dentro de la envolvente económica (analogía con la variable TOPO).
- g) La secuencia de extracción la realiza sólo de forma lineal sin un ángulo de incidencia en el avance. Se recomienda ingresar un nuevo parámetro asociado al ángulo de avance para generar diferentes formas en el avance para el secuenciamiento. De esta manera se pueden utilizar criterios geomecánicos para la definición de la forma del frente de avance. Adicionalmente se recomienda implementar más de un frente de avance.
- h) El plan de producción carece de reportes por punto de extracción, fundamental para la planificación.
- i) La tasa de extracción debe estar en función del porcentaje extraído por columna y no por alturas fijas.
- j) La tasa de extracción vertical debe estar en unidades ton/m<sup>2</sup>/día.
- k) Falta entregarle al procedimiento una estrategia de extracción en función de los puntos de extracción nuevos, activos y en cierre.

## **CAPÍTULO 5: SIMULACIONES EN REBOP**

Para la realización de las simulaciones se tomó en cuenta las restricciones dadas por MSBPC en cuanto a la configuración del modelo. En primer lugar, MSBPC no considera una configuración distinta a una malla cuadrada para la generación del modelo diluido en función de los puntos de extracción, por lo que se asume una malla cuadrada donde los bloques del modelo original configurarán las áreas de influencia respectiva. En segundo lugar, de acuerdo a lo visto en el capítulo anterior sobre la generación del plan de producción, se tendrán que generar columnas de extracción de altura uniforme para manejar la variable Tasa de Producción debido a que está determinada por altura y no por porcentaje de extracción relativo a cada columna sólida.

Las simulaciones se efectuaron en tres conjuntos principales, el primero con la finalidad de verificar cómo varía la matriz de mezcla vertical en función del secuenciamiento de extracción, el segundo set tiene la finalidad de cuantificar la influencia de la dilución horizontal y el tercero corresponde a simulaciones generales donde se estudia el efecto de las dos variables y cómo estas definen la mezcla en función de las secuencias de extracción.

### **5.1. Generación del Modelo de Bloques**

El modelo de bloques generado tiene la finalidad de entregar una envolvente económica simple de la cual se pueda analizar con facilidad las diferencias entre las reservas en función de las simulaciones generadas. Considerando las restricciones dadas de la validación de MSBPC, el modelo de bloques se configura de la siguiente manera.

- Bloques de tamaño 15x15x15 [m]
- Densidad uniforme 2.7 [ton/m<sup>3</sup>]
- Distribución de leyes en altura para una región específica
- Variable que indica la dilución (en función de la envolvente económica)

Las siguientes imágenes muestran la visualización de las variables principales del modelo.

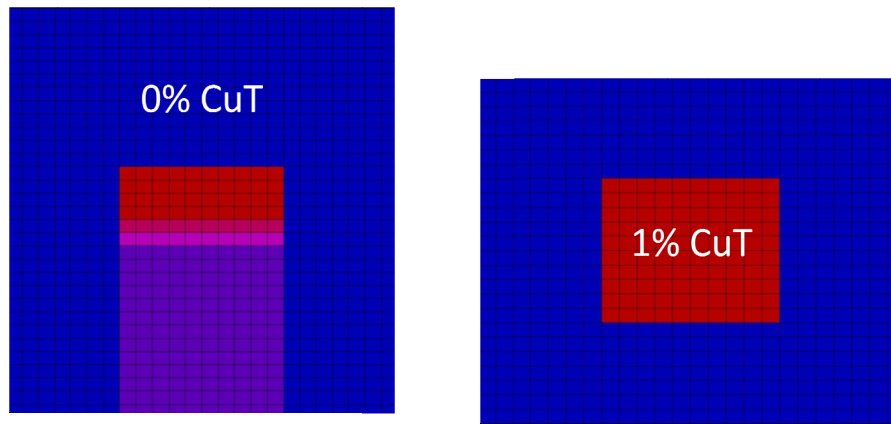


Figura 5.1. Visualización de la variable "Ley CuT". Izquierda vista perfil y derecha vista en planta.

De la figura se puede notar la distribución de leyes considerando en azul ley 0%. Los valores positivos varían del color morado al rojo hasta una cierta altura donde la ley nuevamente es 0% (color azul). En la planta se aprecia la configuración de la ley (en rojo) que corresponde a un cuadrado de 10x10 bloques. La finalidad de esta configuración es determinar una envolvente económica simple (como un paralelepípedo) considerando un modelo económico estándar.

La siguiente tabla muestra en detalle la distribución de leyes en altura para la zona mineralizada considerando que las 100 columnas mineralizadas tienen exactamente la misma distribución de leyes.

Tabla 5.1. Distribución de leyes en altura

Altura	Ley
390	0.0%
375	0.0%
360	0.0%
345	0.0%
330	0.0%
315	0.0%
300	0.0%
285	0.0%
270	0.7%
255	0.7%
240	0.7%
225	0.7%
210	0.8%
195	0.9%
180	1.0%
165	1.0%
150	1.0%
135	1.0%
120	1.0%
105	1.0%
90	1.0%
75	1.0%
60	1.0%
45	1.0%
30	1.0%
15	1.0%
0	1.0%

La siguiente variable corresponde al tipo de roca que para efectos de planificación está relacionado con la tasa de extracción de acuerdo al parámetro de hundibilidad.



Figura 5.2. Vista en perfil de la variable "Tipo de Roca".

El sector primario está caracterizado por una roca de menor hundibilidad que el sector secundario. Los últimos cuatro niveles del modelo de bloques corresponden a aire.

La última variable importante corresponde a la variable que define la dilución. Esta variable se le ingresa al modelo diluido una vez calculada su envolvente económica. La finalidad de esta variable es reportar la dilución en porcentaje de acuerdo a la extracción. La siguiente figura muestra una vista en perfil de la variable.



Figura 5.3. Variable Dilución "Ley Dil".

Como se aprecia de la figura, esta variable considera mineral todo lo que contiene ley positiva en un inicio considerando el modelo diluido y la corrida de BHOD. En este caso resultó ser de la misma forma que la zona mineralizada. El detalle de las reservas de acuerdo a MSBPC se verá en el capítulo "Análisis de Resultados".

## 5.2. Generación de puntos de extracción

La generación de puntos de extracción del modelo está restringida a los puntos de extracción que determina MSBPC, en ese caso, se agregan puntos de extracción de acuerdo al modelo de bloques por lo que queda determinado por una malla cuadrada de espaciamiento equivalente al tamaño de los bloques.

Para la simulación en REBOP se definen 100 puntos de extracción en una malla cuadrada de 15x15 m acorde con la mineralización mostrada en las 3 figuras anteriores. La geometría de batea se define acorde al modelo de bloques.

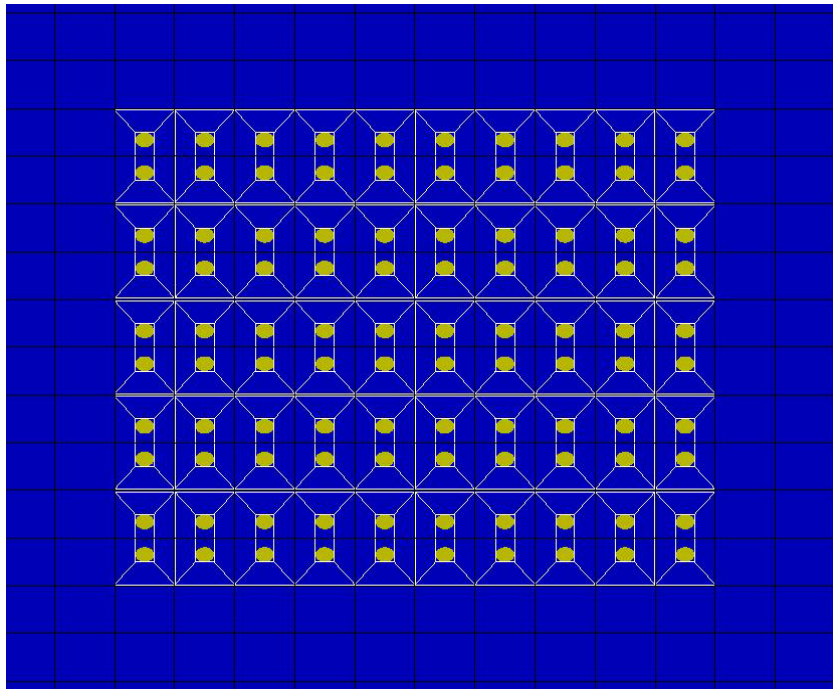


Figura 5.4. Vista en planta de los puntos de extracción.

En la figura se aprecia la malla cuadrada, los 100 puntos de extracción representados en amarillo considerando las bateas acorde a los bloques del modelo.

Es importante destacar que para el estudio, la geometría y la distribución de puntos de extracción se considera fija para todas las simulaciones con el fin de que no interfieran estas variables en los resultados obtenidos.

### 5.3. Secuenciamiento de extracción

Para las simulaciones en REBOP se definen 8 tipos de pruebas variando el secuenciamiento de extracción en Panel Caving como la configuración de apertura de bloques en Block Caving. Adicionalmente se dejará fijo el ritmo de extracción, acorde con los reportes entregados por MSBPC para que no sea una variable que influya en la diferenciación de resultados para las pruebas de secuencia.



Tabla 5.2. Tipos de Pruebas para simulaciones en REBOP.

ID Prueba	Secuencia	Observación	TPD
P4	Panel	Frente 45°	9000
P5	Panel	Frente 0°	9000
P6	Panel	Frente 90°	9000
P7	Panel	Frente 60°	9000
P8	Block Total	-	9000
Q1	Block Parcial	-	9000
Q2	Block Parcial	-	9000
Q3	Block Parcial	-	9000

Las secuencias de extracción y los planes de producción fueron realizados en MSBPC teniendo en cuenta las siguientes restricciones para Panel Caving.

- Máxima área añadida por periodo: 18.000 m<sup>2</sup>.
- Área abierta máxima: 20.000 m<sup>2</sup>.
- Ritmo de extracción de 9.000 tpd.

En el caso de las pruebas de Block Caving.

- Área de bloques de 5625 m<sup>2</sup>. (Para las pruebas Q1, Q2 y Q3).
- Ritmo de extracción de 9.000 tpd.

El caso de la prueba P8, corresponde a la simulación conceptual de un block caving donde todo el bloque se extrae uniformemente en cada periodo (área de 10.000 m<sup>2</sup>). Todos los puntos de extracción tienen la misma productividad por periodo. Si bien, es poco factible alcanzar esas áreas para block caving, importa el ejercicio conceptual debido a la posible diferencia con la mezcla en cuanto a secuencias de extracción distintas a la uniforme. A continuación se muestra gráficamente la geometría de las secuencias.

19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
18	17	16	15	14	13	12	11	10	9
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Figura 5.5. P4

10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.6. P5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura 5.7. P6

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	9	8	7	6	5	4	3	2	2
10	9	8	7	6	5	4	3	2	2
10	9	8	7	6	5	4	4	4	4
10	9	8	7	6	5	4	4	4	4
10	9	8	7	6	5	5	5	5	5
10	9	8	7	6	5	5	5	5	5
10	9	8	7	6	6	6	6	6	6
10	9	8	7	6	6	6	6	6	6

Figura 5.8. P7

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.9. P8

2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4

Figura 5.10. Q1

1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4

Figura 5.11. Q2

4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2

Figura 5.12. Q3

Este set de pruebas se simuló para las tres situaciones descritas en la introducción del capítulo, las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 5.3. Tipos de pruebas para la simulación en REBOP.

Nº Estudio	Objetivo	Observación
Estudio 1	Mezcla Vertical	Se restringe la propagación del Caveback sólo verticalmente para los puntos de extracción
Estudio 2	Mezcla Horizontal	Se analiza cómo ingresa la mezcla horizontal a los puntos de extracción de acuerdo a la posición inicial de los marcadores
Estudio 3	Mezcla Horizontal y Vertical	Se analiza la influencia de la secuencia de extracción en los modelos diluidos

Es importante recalcar que los números que se encuentran dentro de las figuras anteriores (desde la 5.5 a la 5.12) representan el orden de abertura de los puntos de extracción en el área total a extraer. Desde la figura 5.5 a la figura 5.8 están representadas las pruebas de Panel Caving (considerando una secuencia de extracción continua) que corresponden desde la prueba P4 a la prueba P7. El caso de las pruebas de Block Caving, el orden de la abertura de los bloques está representado por el número en los puntos de extracción, encontrándose principalmente, 4 áreas por prueba.

#### 5.3.1. Estudio 1.

Este estudio tiene el objetivo analizar la mezcla vertical para lo cual se fija la propagación del hundimiento en REBOP sólo en sentido vertical para cada punto de extracción. Como se vió en el capítulo de antecedentes, en REBOP existe una variable llamada “cave period” en la cual el programa define en qué periodo cada bloque pasa a ser parte del material quebrado. Para lograr la comparación de la mezcla vertical en función de las secuencias todos los bloques que estaban fuera del área mineralizada se les asignó un periodo de quiebre muy superior al último periodo de extracción para que estos nunca estuvieran en quiebre durante la simulación.

#### 5.3.2. Estudio 2.

Para analizar la mezcla horizontal se considera que todo el modelo está en condiciones de ser material quebrado. Luego, del reporte de marcadores que genera REBOP se analiza de donde viene el material que no pertenece a la proyección vertical de los puntos de extracción. Este análisis es global, por lo que se basa en la totalidad del modelo, no por punto de extracción con la finalidad de cuantificar el porcentaje global de incidencia de la dilución horizontal, de acuerdo a contornos laterales de la envolvente económica como lo muestra la siguiente figura.

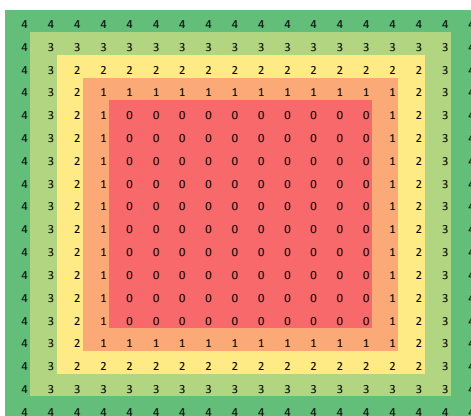


Figura 5.13. Contornos de mezcla horizontal.

En rojo se aprecia la zona mineralizada por lo que se considera como dilución horizontal sólo lo que está determinado por lo que se encuentra en el exterior de la zona roja. De acuerdo a las simulaciones, se considera dilución horizontal el material que se extrae por los puntos de extracción y que corresponden a la zona exterior visualizada desde el contorno de color naranja hasta el verde. De esta manera, se estima cuánto tonelaje y qué porcentaje de la dilución horizontal corresponde a cada uno de los contornos definidos.

### 5.3.3. Estudio 3

En este punto se pretende analizar de forma conjunta el fenómeno de dilución con la herramienta de flujo de manera de definir si existen diferencias en cuanto al secuenciamiento de extracción para generar un modelo diluido de REBOP.

Luego de generar el modelo de bloques, definir la envolvente económica, la secuencia de extracción y el plan de producción en MSBPC, se procede a generar las simulaciones en REBOP. Como se mencionó en el capítulo de Antecedentes, REBOP necesita ciertos parámetros asociados al cálculo del flujo gravitacional basados en la mecánica del caving. Los parámetros escogidos corresponden a los mismos que se utilizaron para definir la validación del software en un proyecto real, por lo que la idea de escoger ese set de parámetros es representar de manera real el proceso de flujo ocurrido en el modelo de estudio. Los parámetros fijos para la simulación son:

Tabla 5.4. Parámetros de entrada para las simulaciones en REBOP.

Parámetros de Entrada REBOP	
MaxPor	0.422382671
FriccAng	50
MeanDia	1
SSDDia	0.4
UCS	1.00E+05

Finalmente, se presenta un ejemplo de simulación en REBOP, donde se aprecia el flujo gravitacional del modelo en capturas por periodo.

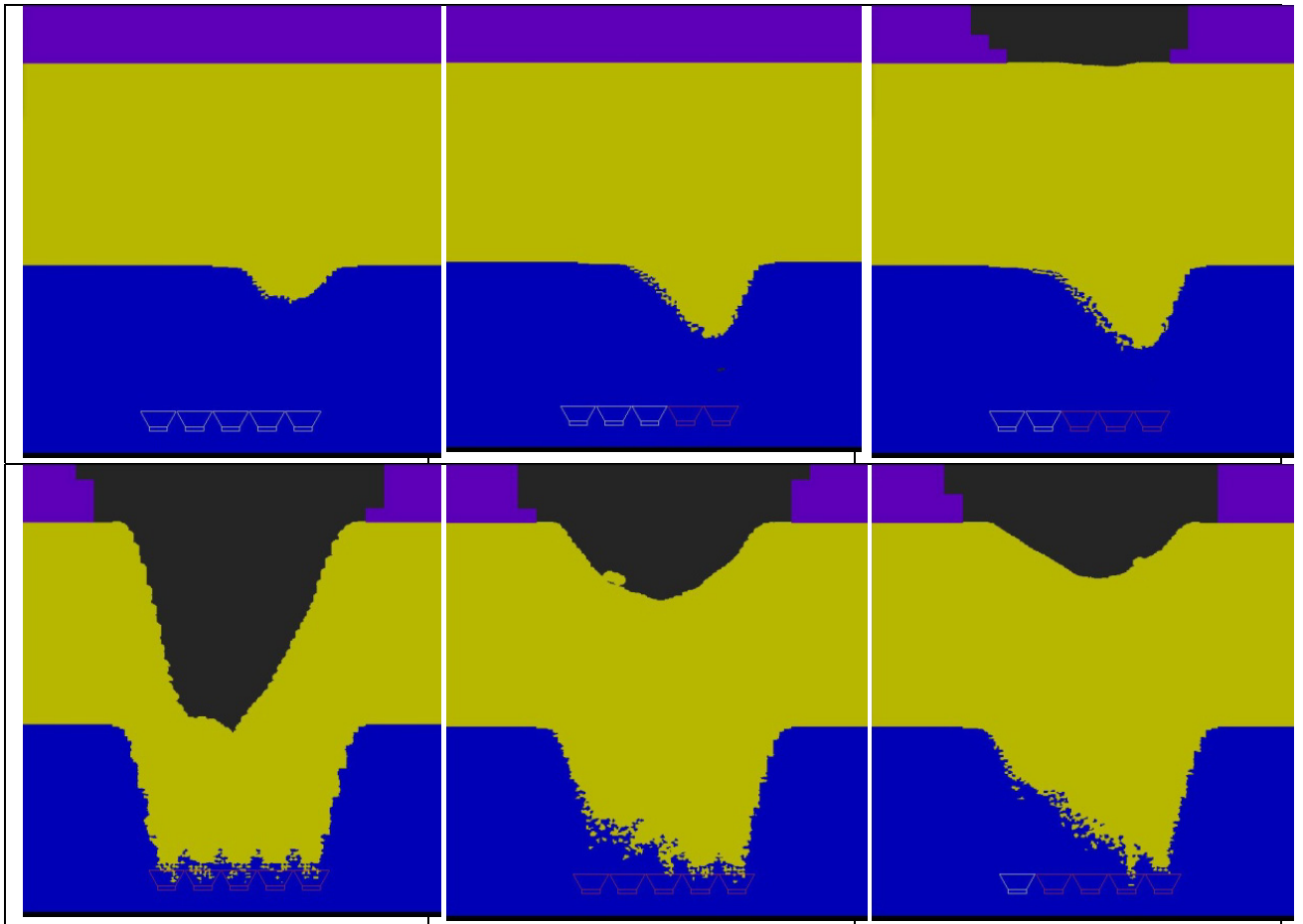


Figura 5.14. Ejemplo de simulación en REBOP, vista en perfil.

## CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Resultados MSBPC

MSBPC, al ser una herramienta de pre-mezcla que utiliza el modelo volumétrico de Laubscher, independiente de la secuencia, es evidente que los resultados del modelo de mezcla y la envolvente económica final arrojarán los mismos resultados.

El primer paso corresponde a la generación del modelo de mezcla. El modelo de Laubscher necesita como parámetro inicial el Punto de Entrada de Dilución (PED). Utilizando la metodología tradicional de Laubscher (Laubscher, Cave Mining, the state of the art, 1994) este punto era de 45%. Se hicieron las comparaciones con simulaciones en REBOP y este arrojó puntos de entrada de dilución cercanos al 40% en la mezcla vertical. Por lo tanto, el PED utilizado para el cálculo del modelo diluido corresponde al de 40% para hacer comparables los resultados con REBOP.

Los resultados del modelo diluido con PED de 40% son los siguientes.

Tabla 6.1. Resultados de leyes diluidas en MSBPC por columna.

Nivel	Columna MSBPC PED 20%		
	Ton [ton]	Ley [%]	Finos [ton]
17	8100	0.62	50.2
16	8100	0.65	52.7
15	8100	0.68	55.1
14	8438	0.71	59.9
13	8775	0.74	64.9
12	9113	0.77	70.2
11	9113	0.79	72.0
10	9113	0.82	74.7
9	9113	0.84	76.5
8	9113	0.86	78.4
7	9113	0.88	80.2
6	9113	0.91	82.9
5	9113	0.95	86.6
4	9113	0.98	89.3
3	9113	1.00	91.1
2	9113	1.00	91.1
1	9113	1.00	91.1

Es importante recordar que la cantidad de puntos de extracción son 100, las cuales tienen la misma distribución de leyes, por lo tanto, todos los puntos tienen el mismo tonelaje y la misma cantidad de finos. El modelo económico utilizado para la definición de reservas se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.2. Parámetros económicos para definición de reservas.

Parámetros Económicos de entrada en MSBPC		
Recuperación Metalúrgica	80	[%]
Costo de Procesamiento	5	[\$/ton]
Costo Mina	2	[\$/ton]
Ley de Concentrado	26	[%]
Humedad del Concentrado	2	[%]
Costo Flete	12	[\$/Cton]
Costo Fundición	75	[\$/Cton]
Precio Metal	1.2	[\$/lb]
Descuento Fundición	0.1	[\$/lb]
Pagable	97	[%]
Costo Refinación	0.04	[\$/lb]
Royalty	0	[%]

Los resultados por columnas (las cuales tienen la misma distribución de leyes) se muestran en la siguiente figura.

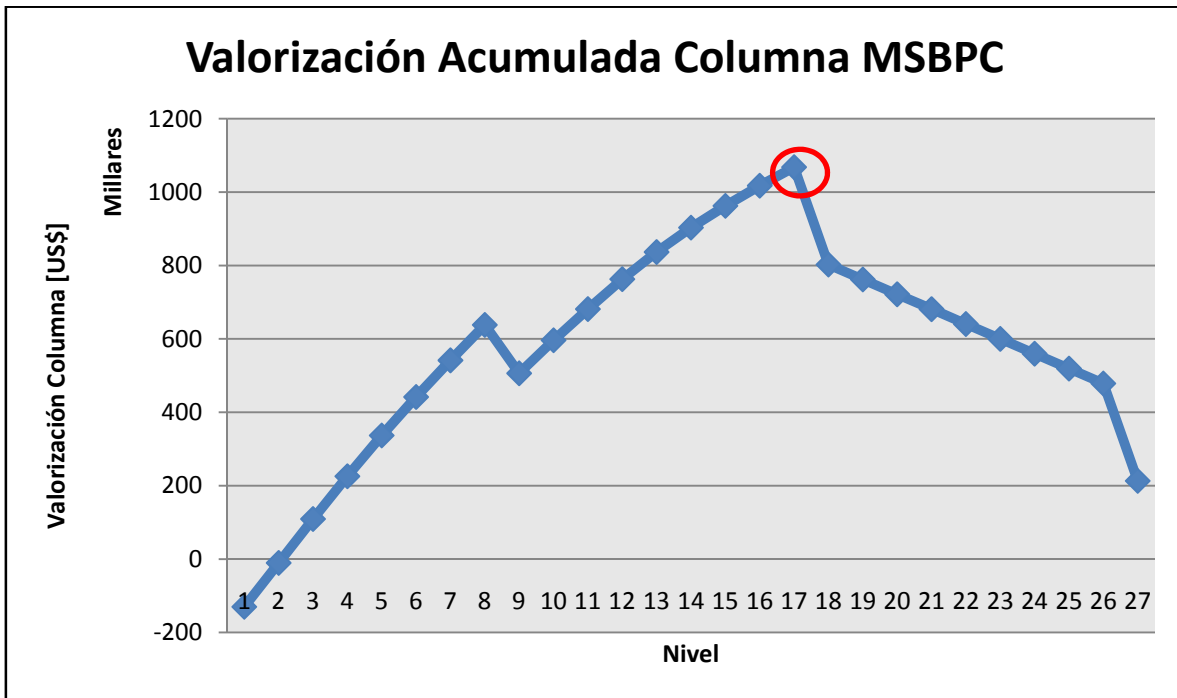


Figura 6.1. Valorización acumulada por columna en MSBPC.

Finalmente, de la valorización en MSBPC, se llega al resultado de que las columnas tienen una altura correspondiente al nivel 17 (255 metros de altura), considerando el máximo beneficio acumulado. En este caso no es necesario generar el proceso de suavizamiento debido a que todas

las columnas representan la misma altura. Un resumen de las reservas obtenidas en MSBPC se muestra a continuación.

Tabla 6.3. Reporte de reservas en MSBPC.

	Tonelaje [ton]	Ley media [%]	Finos [ton]
Columna	150869	0.840%	1267
Reservas Totales	15086900	0.840%	126700

Estos resultados obtenidos de MSBPC corresponden a las reservas totales considerando la premezcla independiente de la secuencia de extracción.

## 6.2. Resultados Estudio 1: Dilución vertical

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo principal de este estudio es verificar cómo afecta la mezcla vertical en función de la secuencia de extracción. Para ello, se hizo un manejo en el modelo de bloques de REBOP con el fin de obtener material sólo en la componente vertical del sector mineralizado, como se muestra en la figura 6.2. Para un mejor entendimiento, se presenta la siguiente figura.

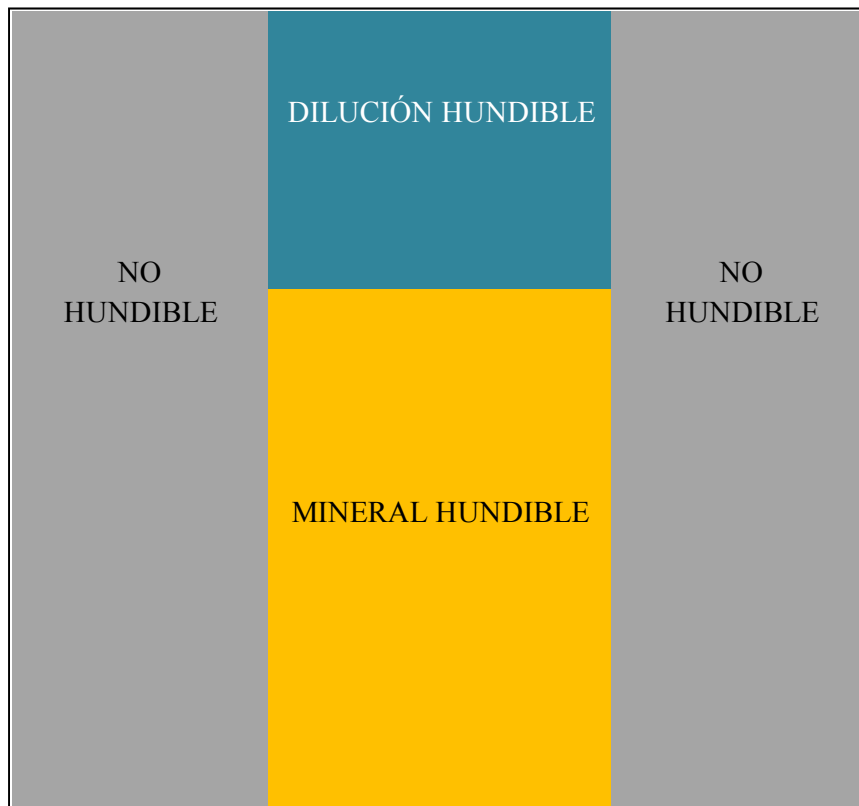


Figura 6.2. Modelo de hundibilidad para la simulación de mezcla vertical en REBOP.



En REBOP se define esta restricción mediante el parámetro de hundibilidad en el modelo de bloques. Se define la zona no hundible como la que no genera material quebrado en ningún periodo durante la extracción, por lo tanto, todo el material asociado a la zona “no hundible” no será extraído por los puntos de extracción durante la simulación.

El objetivo es encontrar las relaciones de acuerdo al tipo de secuencia de extracción (Block o Panel Caving) con la mezcla asociada en cada columna. Para realizar esto, se tiene un código en Matlab con el cual de acuerdo al reporte de marcadores y extracción generado por REBOP se asigna el marcador de acuerdo a un porcentaje de volumen extraído, como el proceso inverso a la pre-mezcla realizado por Laubscher e implementado en MSBPC. El resultado final del programa en Matlab es una matriz de mezcla total en volumen considerando todos los puntos de extracción de la mina. De esta forma se pretende comparar la pre-mezcla de Laubscher con la mezcla ocurrida durante la simulación para la herramienta de flujo gravitacional y cuantificar la diferencia en reservas obtenidas por los dos métodos y por secuencia de extracción.

Los resultados obtenidos directamente de la extracción de REBOP se pueden ver a continuación.

Tabla 6.4. Resultados de la extracción en REBOP para mezcla vertical.

Prueba	Mineral [ton]	Finos [ton]	Ley [%]	PED [%]
P4	14,781,614	123,119	0.833%	40%
P5	15,084,879	123,654	0.820%	49%
P6	14,989,909	122,676	0.818%	56%
P7	15,082,172	123,864	0.821%	52%
Q1	14,055,721	99,994	0.711%	36%
Q2	15,087,710	122,882	0.814%	35%
Q3	15,087,568	123,147	0.816%	53%

De estos resultados anteriores, se nota que la diferencia relevante entre las pruebas corresponde sólo a la comparación genérica entre Panel Caving y Block Caving. Dentro de las pruebas de Panel Caving no existen diferencias sustanciales por lo que no se puede aseverar que la mezcla vertical incide de manera relevante cuando se estudia en función de la secuencia de extracción. Sin embargo, entre Panel Caving y Block Caving existen diferencias relevantes en cuanto a la entrada de la dilución vertical. Para el caso de las leyes la diferencia es menor. La siguiente tabla resume el análisis.

Tabla 6.5. Diferencia entre Panel y Block Caving para mezcla vertical.

	Ley [%]	PED [%]
P	0.82%	49.3%
Q	0.78%	41.4%
Dif. Rel	5.4%	19.1%
MSBPC	0.845%	40%
Diferencia Relativa		
P/MSBPC	2.67%	
Q/MSBPC	8.24%	

Promediando las pruebas de Panel Caving (Pruebas P) y las de Block Caving (Pruebas Q) se aprecia que en cuanto a leyes, el Panel Caving entrega del orden de un 5.4% mayor con respecto al Block Caving. En el caso de la dilución, PED es menor para Panel Caving, un 19% que en el Block Caving. Esto permite determinar que el fenómeno físico que incurre en la baja de leyes es la entrada más temprana de la dilución por tratarse de extracciones de bloques en secuencias discretas a diferencia del panel caving que la secuencia comprende aberturas y cierres de puntos de extracción de forma continua.

Por otro lado, la diferencia con lo planificado según la pre-mezcla, independiente de la secuencia, tiene a sobrestimar las reservas con respecto a REBOP. El error relativo entre Panel Caving y MSBPC arroja resultados de mezcla vertical cerca del 2.7% mayores mientras que para el caso del Block Caving, MSBPC arroja leyes 8.2% mayores. Obviamente esto incide directamente en la estimación de reservas.

Finalmente, se puede resumir según la tabla anterior que el Panel Caving arroja leyes 5.4% mayores que para Block Caving debido a la entrada de dilución vertical más temprana en Block Caving y la pre-mezcla sobrestima el valor de las leyes (considerando un PED acorde a los resultados del modelo de flujo) entre un 2.5% a un 8% dependiendo de la secuencia de extracción.

Una vez obtenidos los resultados de la extracción, se procede a estudiar los reportes de los marcadores con los cuales, mediante Matlab, se obtienen las matrices de mezcla y luego del análisis, las curvas de mezcla se muestran a continuación por prueba.

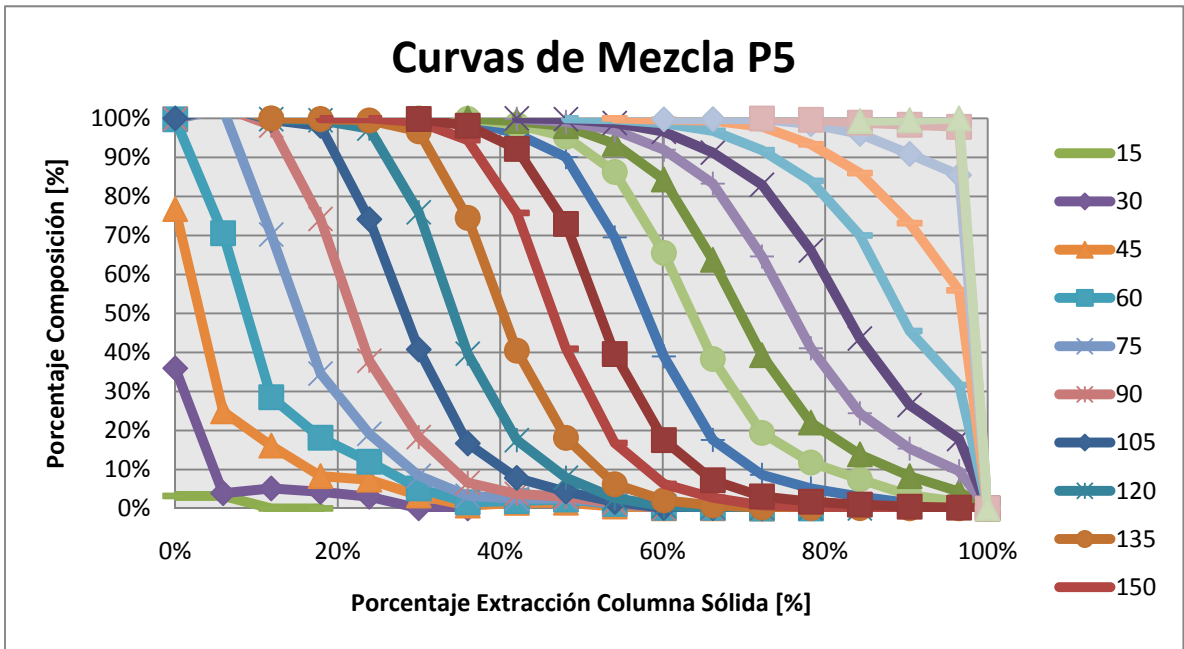


Figura 6.3. Curvas de mezcla para P5.

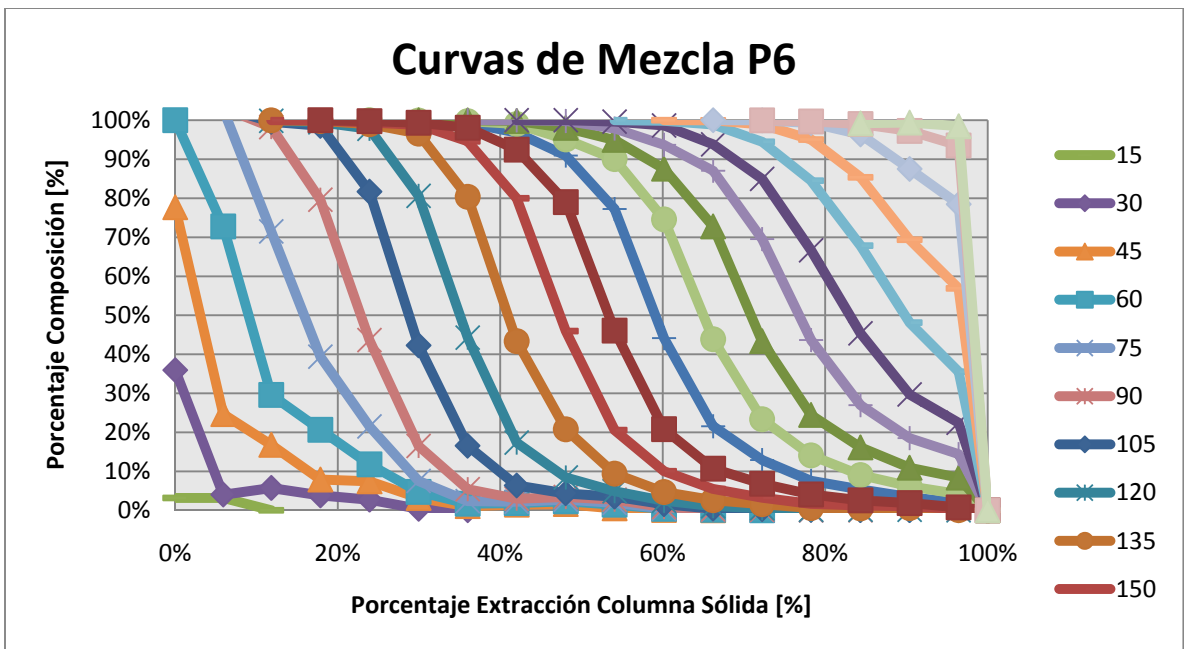


Figura 6.4. Curvas de mezcla para P6.

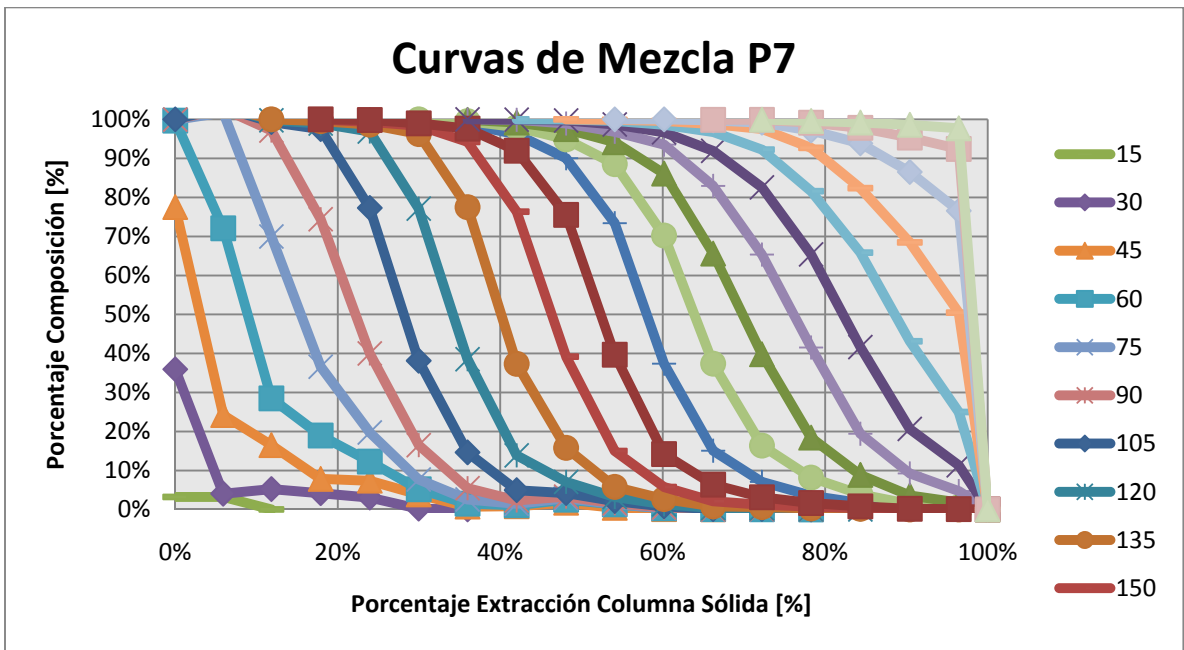


Figura 6.5. Curvas de mezcla para P6.

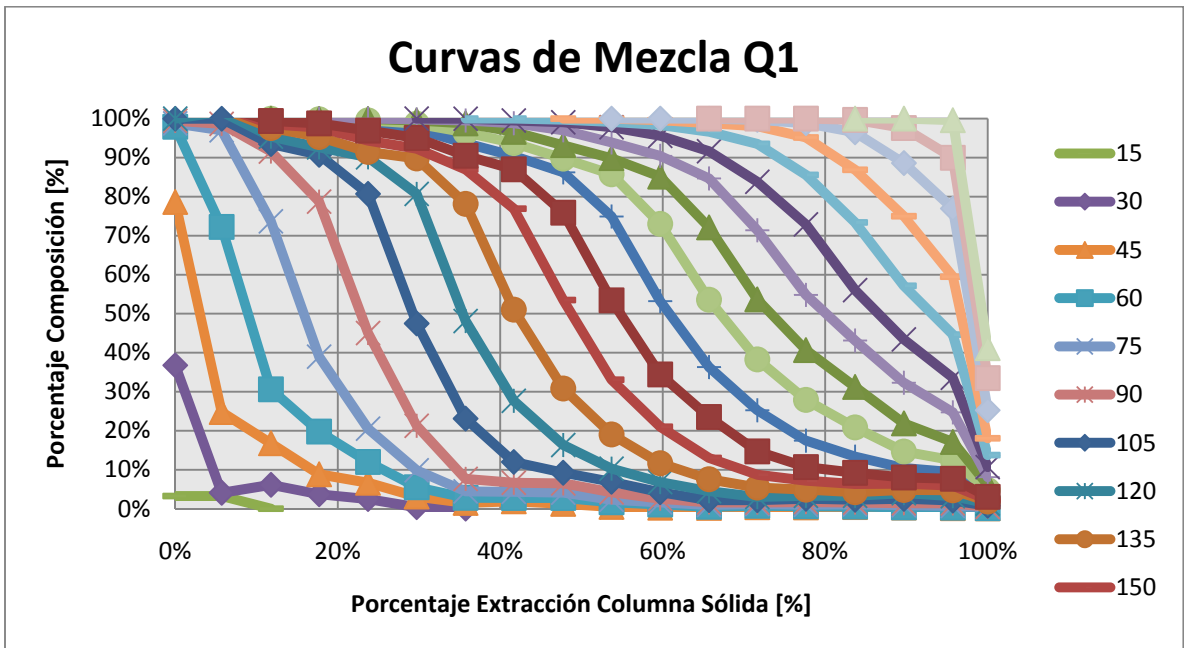


Figura 6.6. Curvas de mezcla para Q1.

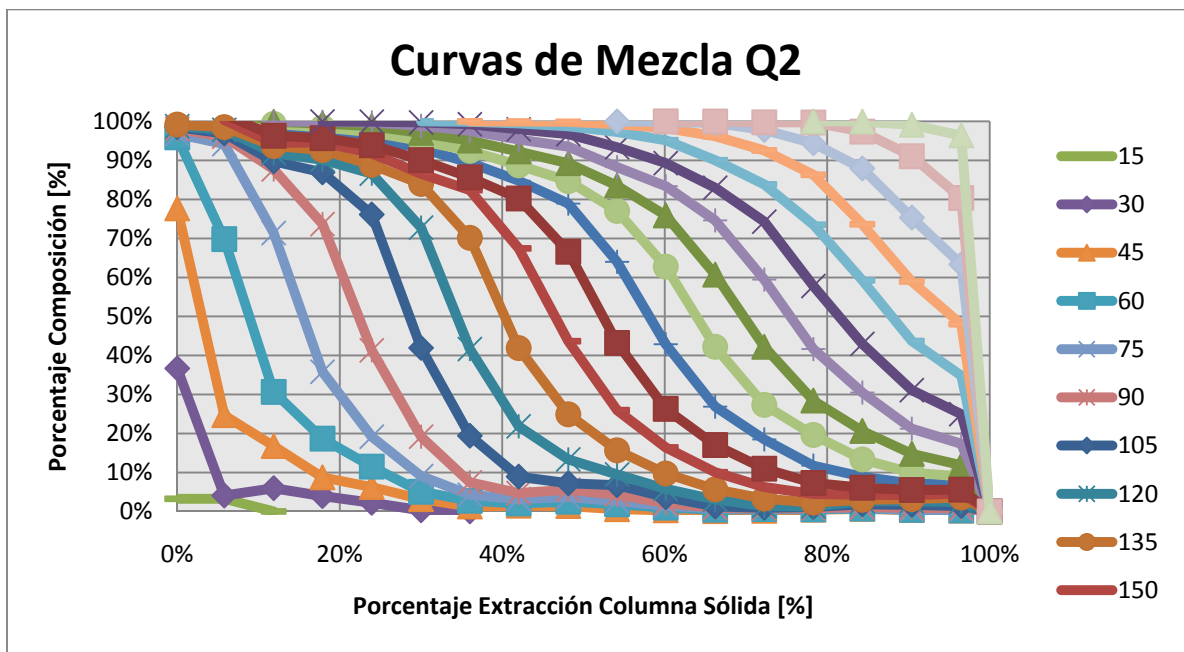


Figura 6.7. Curvas de mezcla para Q2.

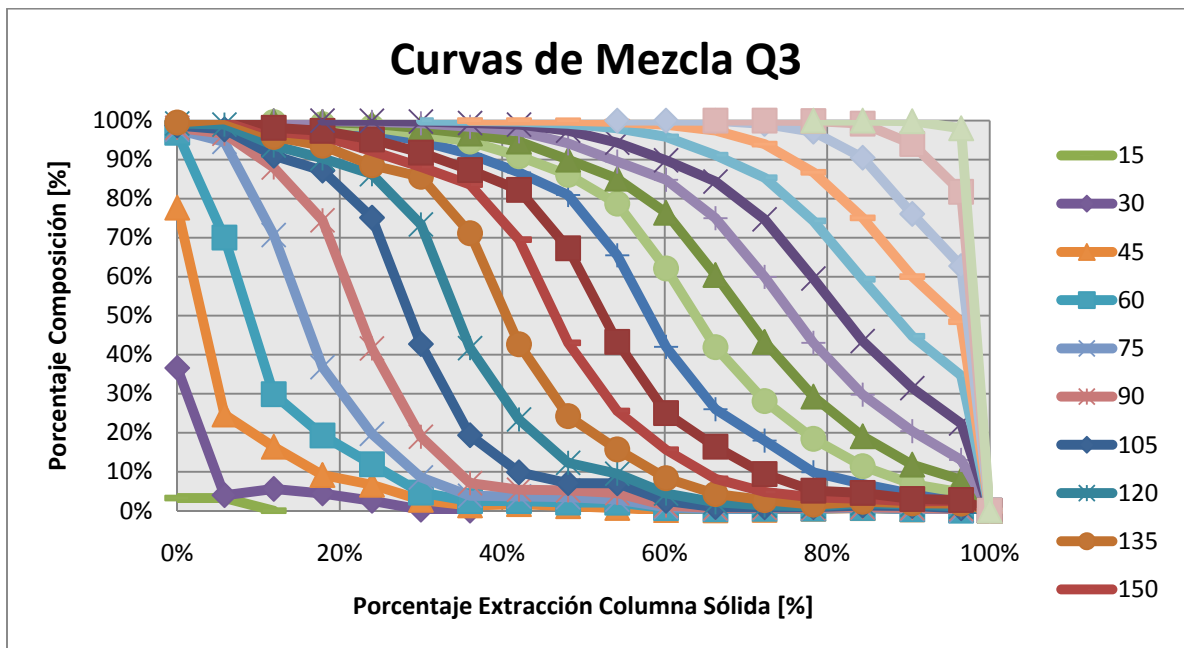


Figura 6.8. Curvas de mezcla para Q3.

De los gráficos se puede apreciar una mezcla similar a la pre-mezcla de Laubscher para los 7 casos de estudio. Una vez obtenidas las matrices de mezcla, el próximo paso corresponde al cálculo de reservas considerando el material diluido. Para esto se necesita multiplicar la matriz de dilución con el vector de leyes in situ (Tabla 5.1). De este resultado se obtienen las reservas estimadas para cada una de las secuencias. El resultado obtenido se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.6. Resultados matrices de mezcla vertical por prueba.

	Reservas/Columna [ton finos]	Res. Total [ton finos]	Ley [%]
P4	1,338	133,780	0.89%
P5	1,334	133,425	0.88%
P6	1,342	134,217	0.89%
P7	1,322	132,167	0.88%
Q1	1,358	135,783	0.76%
Q2	1,296	129,597	0.86%
Q3	1,301	130,093	0.86%

En este resultado se observa la misma tendencia obtenida de los resultados de extracción para la mezcla vertical, donde se ven leyes mayores para las pruebas de Panel Caving versus las pruebas de Block Caving. Sin embargo, dentro de las pruebas de Panel Caving no existen diferencias sustanciales. El resumen de los resultados de las matrices de mezcla se observa a continuación.

Tabla 6.7. Resumen matrices de mezcla vertical.

Resumen	Reservas/Columna [ton finos]	Res. Total [ton finos]	Ley [%]
P	1,334	133,397	0.88%
Q	1,318	131,825	0.83%
Dif. Rel.			6.58%

Esta estimación de leyes de acuerdo a las matrices de mezcla dan un resultado en ley de 6.58% mayor en el Panel Caving versus Block Caving, a diferencia de los resultados obtenidos directamente de los reportes de extracción correspondientes a un 5.3% mayor en Panel versus Block Caving. Esta diferencia se puede asumir como error de aproximación en volúmenes para la generación de las matrices de mezcla. Lo anterior se puede aseverar observando el siguiente gráfico de tendencia.

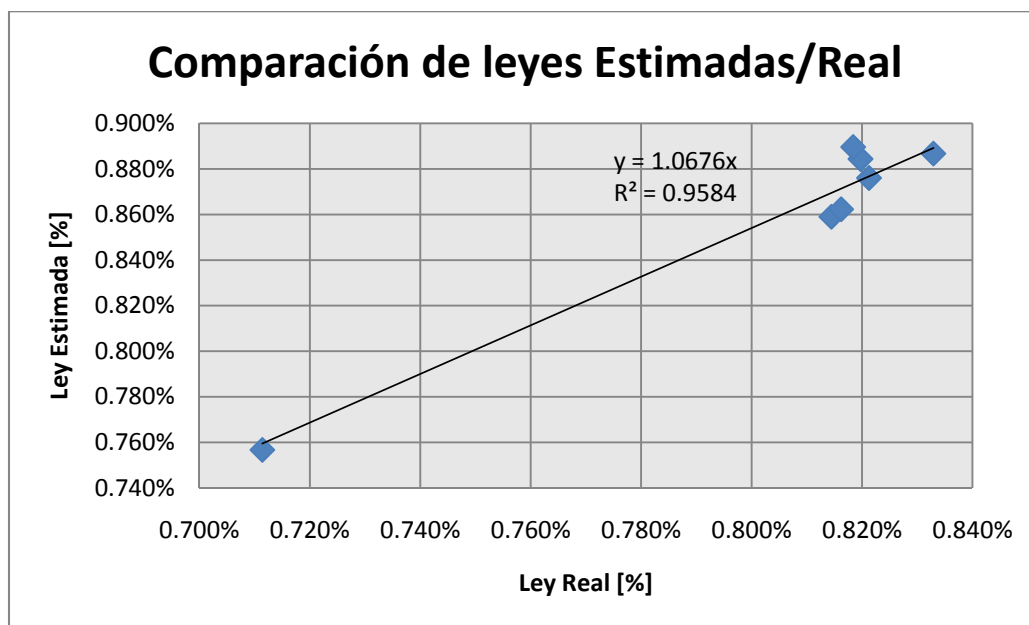


Figura 6.9. Relación entre leyes estimadas por mezcla y por medio de la simulación para mezcla vertical.

Si bien el número de pruebas comparadas son pocas, la tendencia muestra una relación aceptable dentro para la estimación de leyes realizada por las matrices de mezcla con un  $R^2$  de 0.958.

Lo anterior verifica la correcta realización de las matrices de mezcla y la consideración sobre la diferencia entre las pruebas de Panel y Block Caving. Los resultados corroboran que efectivamente existen diferencias en la estimación de reservas para la mezcla vertical, dependiendo del método de secuenciamiento. El Panel Caving retrasa la entrada de dilución debido a la continuidad de apertura y cierre de puntos mientras que el Block Caving, dada la apertura discreta de sectores de extracción, genera eventos que permiten una entrada más temprana de la dilución lo que conlleva a tener una ley media total más baja, en consecuencia, una menor cantidad de finos reportada en total, para la extracción de la mina.

### 6.3. Resultados Estudio 2: Dilución lateral

El estudio 2 tiene relación con la cuantificación de la entrada de dilución lateral, entendiéndose como esta, al material sin ley, que puede fluir a la zona de extracción y que se encuentra lateralmente, fuera de la envolvente económica. Como se mostró en el capítulo anterior, se definen 5 sectores de envolvente con respecto a las reservas (figura 5.13). Estos sectores se identifican como ID1, ID2, ID3, ID4, ID5, donde cada sector tiene un ancho de 7.5 metros de forma circundante a la envolvente económica, considerando como ID1 el más cercano a la envolvente económica hasta ID5 siendo el más lejano en el sentido horizontal. A continuación se muestran los resultados por prueba.

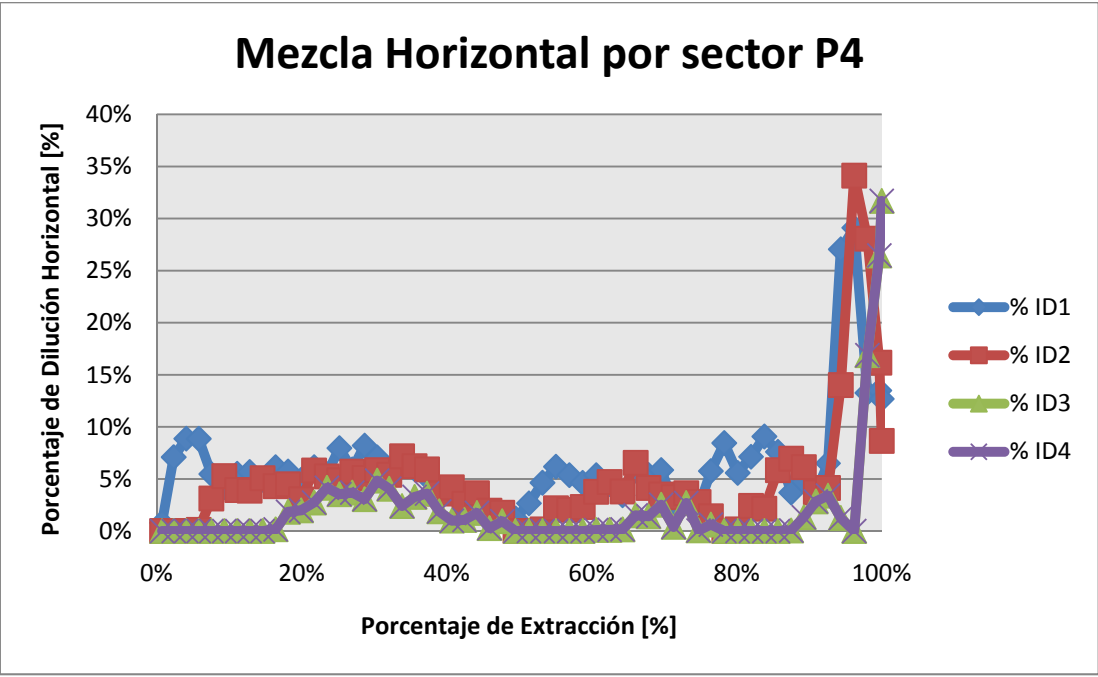


Figura 6.10. Mezcla horizontal por sector. P4.

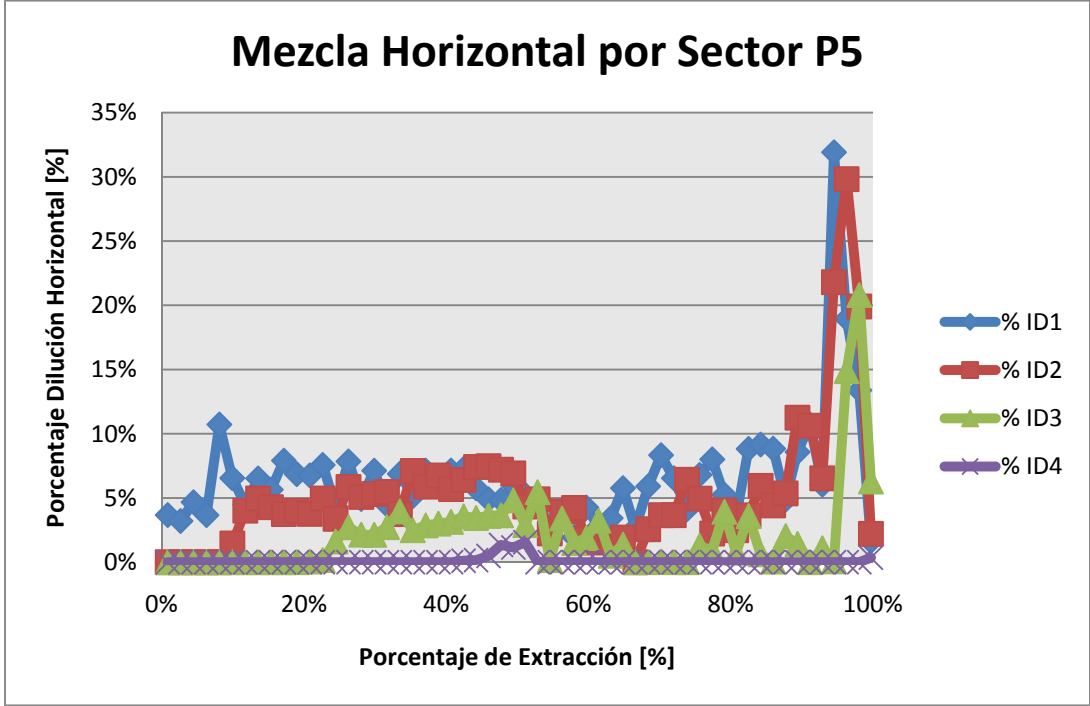


Figura 6.11. Mezcla horizontal por sector. P5.



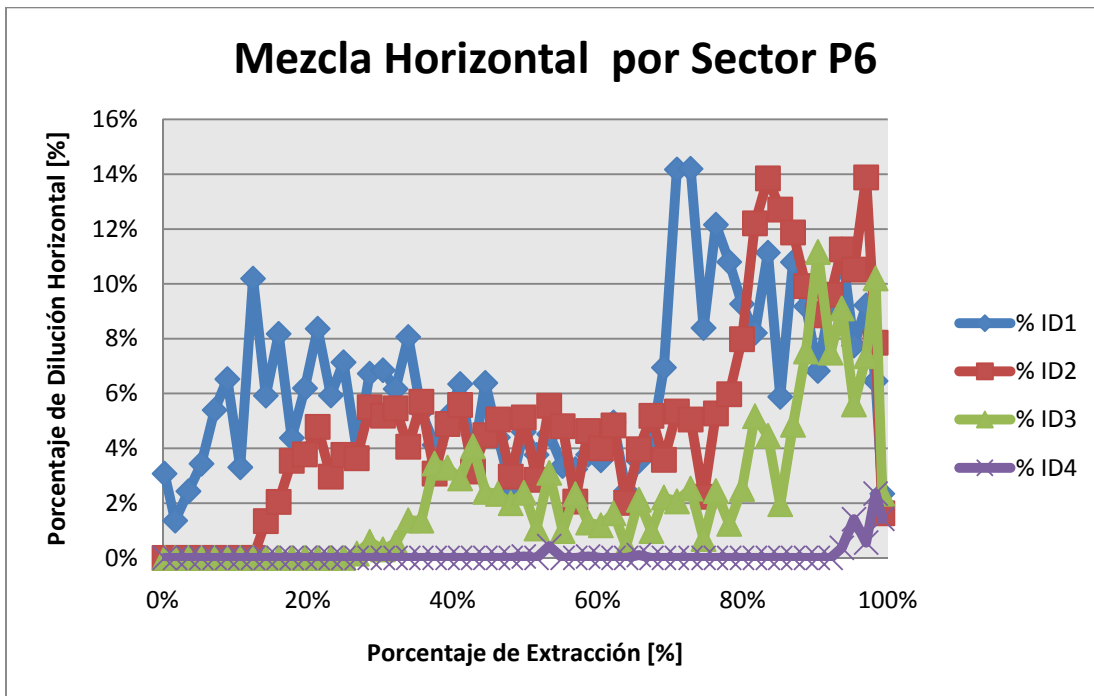


Figura 6.12. Mezcla horizontal por sector. P6.

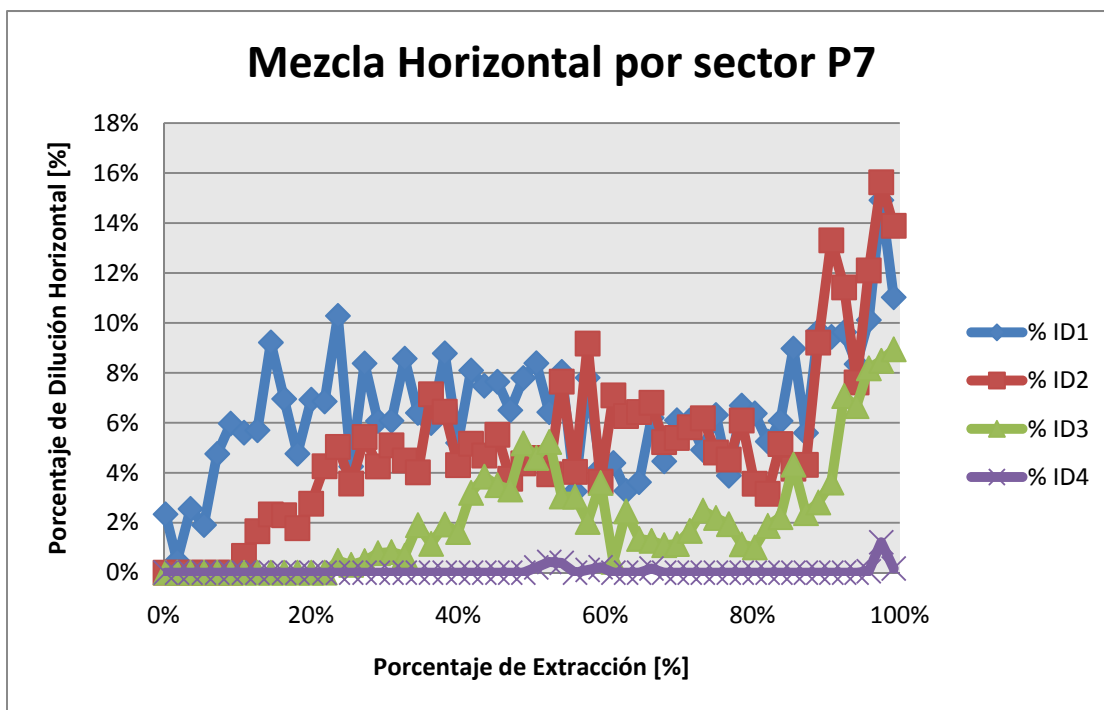


Figura 6.13. Mezcla horizontal por sector. P7.

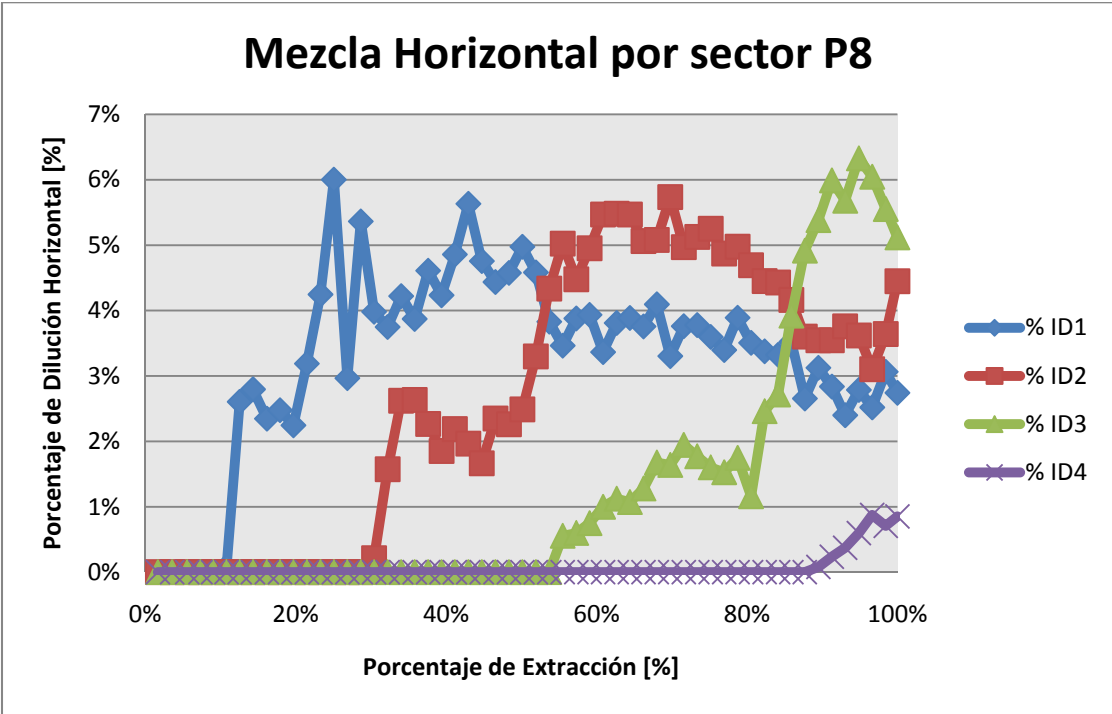


Figura 6.14. Mezcla horizontal por sector. P8.

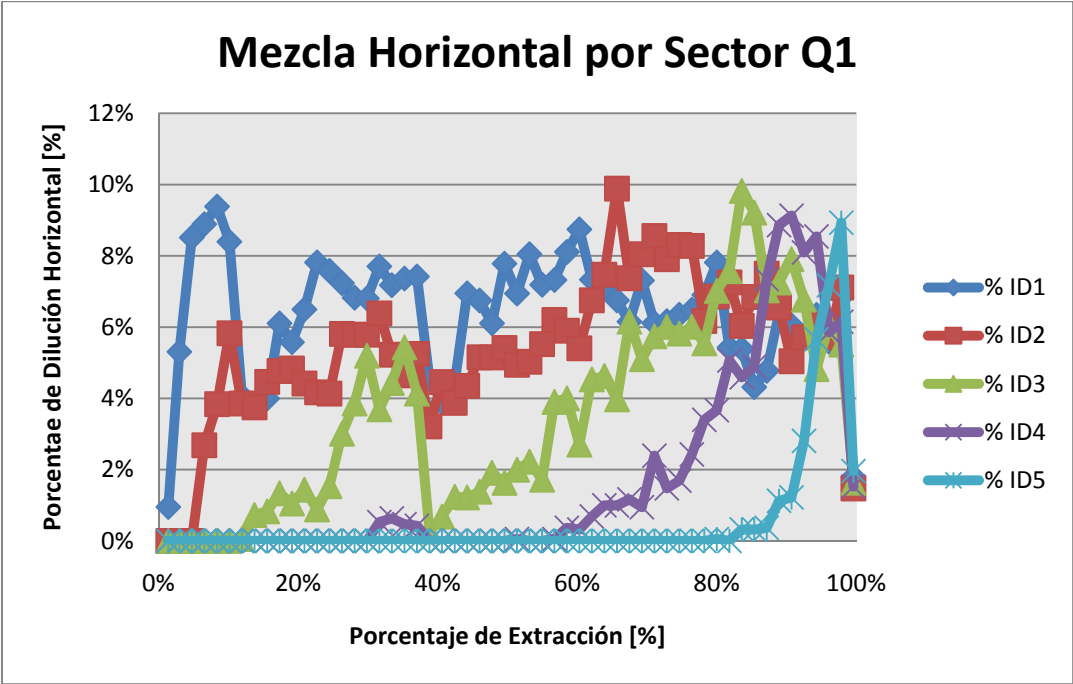


Figura 6.15. Mezcla horizontal por sector. Q1.

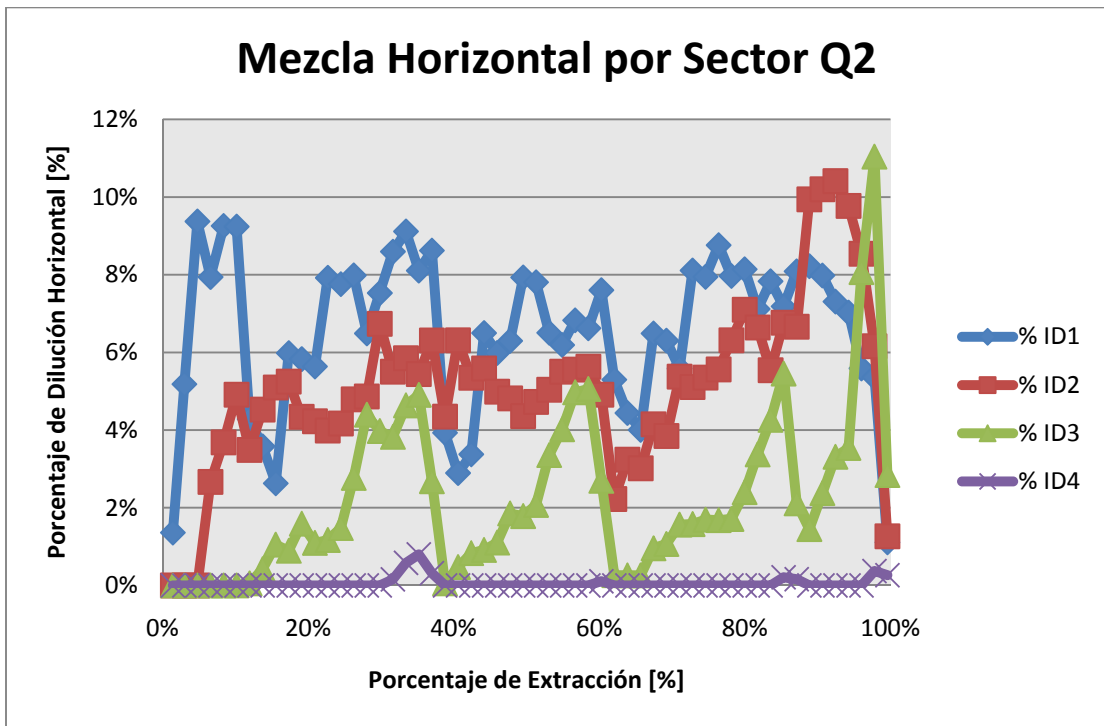


Figura 6.16. Mezcla horizontal por sector. Q2.

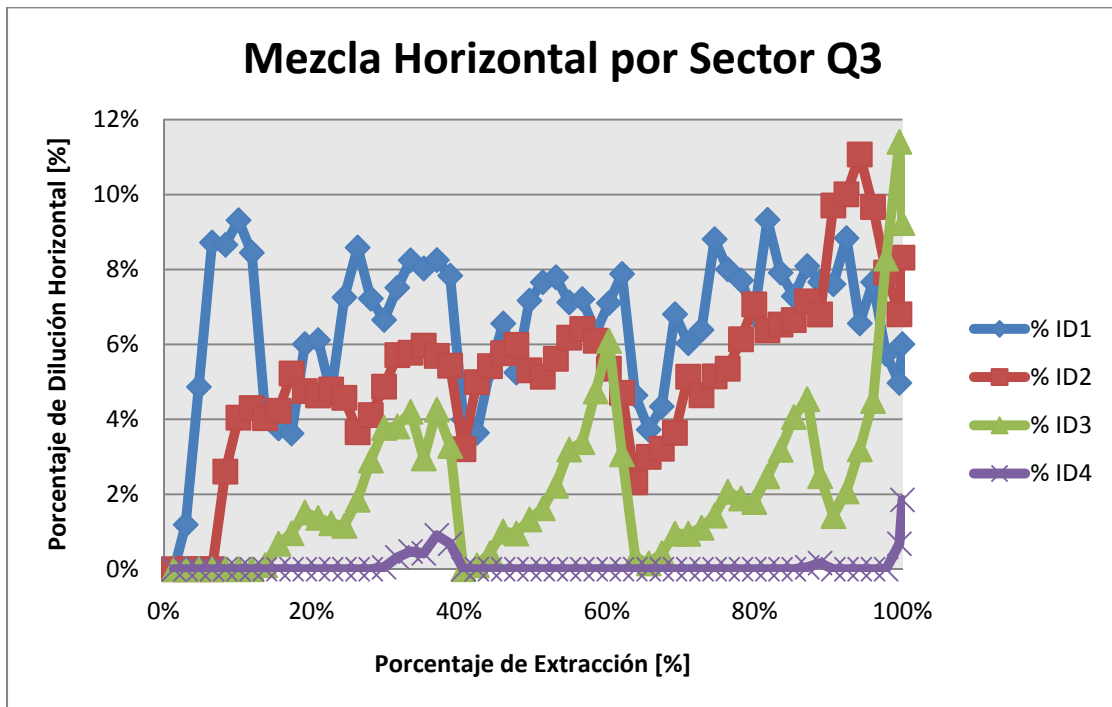


Figura 6.17. Mezcla horizontal por sector. Q3.

De las figuras se aprecia principalmente que la dilución lateral entra en forma temprana considerando el porcentaje de extracción total de la mina. En cuanto a los sectores y la forma de las curvas, se puede discriminar de acuerdo a cómo entran las secuencias en producción. En el

caso de las secuencias de Panel Caving (Pruebas P) el porcentaje de dilución lateral extraído mantiene una tendencia errática, considerando que siempre la mayor contribución de dilución lateral corresponde al sector ID1, el cual está inmediatamente adyacente a los puntos de extracción. En el caso de las pruebas de Block Caving (Pruebas Q) se puede apreciar que la entrada de dilución está relacionada principalmente a la entrada en producción de los bloques, con altos y bajos aunque también se aprecia que la principal componente de dilución lateral corresponde al sector ID1, luego ID2 hasta llegar al ID4 aunque este se incluye de manera prácticamente insignificante, con contribuciones menores al 1% en todas las pruebas de Panel y Block caving, lo que corresponde de una influencia de dilución lateral de 30 metros de los puntos de extracción más laterales.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de la contribución de material lateral a los puntos de extracción.

Tabla 6.8. Resumen de contribución lateral por pruebas.

Prueba	Tonelaje Total [ton]	Tonelaje Lateral [ton]	Tonelaje Lateral [%]	Contribución Lateral				
				ID1 [%]	ID2 [%]	ID3 [%]	ID4 [%]	ID5 [%]
P4	14,781,614	1,965,740	13.3%	6.32%	4.92%	1.97%	0.09%	0.00%
P5	15,089,303	2,131,758	14.1%	6.60%	5.25%	2.18%	0.09%	0.00%
P6	14,992,473	2,048,749	13.7%	6.38%	4.95%	2.24%	0.09%	0.00%
P7	15,087,441	2,085,911	13.8%	6.51%	5.08%	2.18%	0.05%	0.00%
P8*	30,175,115	2,216,761	7.3%	3.29%	2.69%	1.30%	0.06%	0.00%
Q1	15,076,204	2,633,943	17.5%	6.38%	5.39%	3.51%	1.66%	0.53%
Q2	15,091,154	2,105,560	14.0%	6.54%	5.12%	2.24%	0.05%	0.00%
Q3	15,091,439	2,122,503	14.1%	6.59%	5.20%	2.20%	0.07%	0.00%

De la tabla se puede observar que la mayor contribución de dilución lateral corresponde al sector inmediatamente vecino a la envolvente económica correspondiente a un 6% del total de la columna extraída. De la tabla anterior no se puede apreciar una diferencia sustancial en la mezcla horizontal de acuerdo al secuenciamiento de extracción aunque sí por método de secuenciamiento como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 6.9. Resumen de dilución horizontal por método de secuenciamiento.

	Valores Promedio					
	Total	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5
Pruebas P	13.73%	6.45%	5.05%	2.14%	0.08%	0.00%
Pruebas Q	15.16%	6.50%	5.24%	2.65%	0.59%	0.18%
Delta $\Delta$ [Q-P]	1.43%	0.05%	0.18%	0.51%	0.51%	0.18%

Es importante notar que la prueba P8 no fue incluida en el cálculo por tratarse sólo de una simulación conceptual. Dentro de las pruebas en estudio, considerando las de Panel Caving (pruebas P) y las de Block Caving (Pruebas Q) se aprecia una diferencia en cuanto a la cantidad de material lateral que es extraído por los puntos de extracción. Las pruebas de Block Caving arrojaron cerca de un 1.43% absoluto más valor de material horizontal. En valores relativos esto representa un 10% adicional de material horizontal para Block Caving versus Panel Caving.

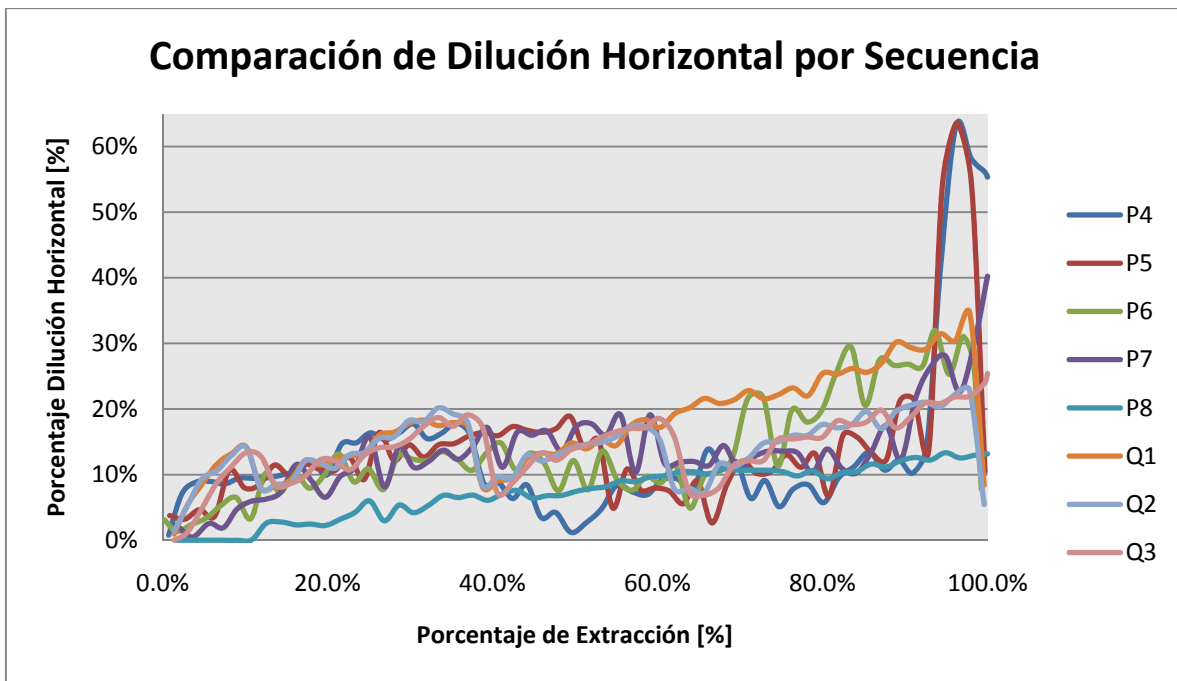


Figura 6.18. Comparación de dilución horizontal por pruebas.

Gráficamente tampoco se aprecia una diferencia sustancial de la incorporación del material horizontal, salvo la tendencia inicial para las pruebas de Block Caving de incorporar una mayor cantidad de material horizontal.

El próximo punto importante a analizar corresponde a la diferenciación en la mezcla horizontal por ubicación de puntos de extracción. Naturalmente, se debería esperar que los puntos de extracción ubicados en los extremos de la envolvente económica tengan una mayor cantidad de dilución horizontal que los puntos que se encuentran en el interior. La cuantificación de la contribución de dilución lateral por sector (ID1, ID2, etc...) debe estar determinada en función de

la ubicación de los puntos de extracción y diferenciar entre Block y Panel Caving. Si bien, se llegó a la conclusión que en términos generales la dilución lateral afecta entre un 13% y un 15% para Panel y Block Caving respectivamente, este dato será de relevancia cuando se aprecie cuales son los sectores reales afectados por la dilución lateral ya que este valor puede variar según la geometría de la mina, considerando geometrías con mayores puntos laterales que otras (Radio Hidráulico). Para verificar esto, inicialmente se muestra una comparación de leyes entre puntos de extracción de acuerdo a la ubicación, llamados puntos “orilla” los que se encuentran en la parte externa de la mina, adyacentes a la dilución lateral mientras que los puntos “centro” corresponden a todos los puntos no adyacentes a material considerado como dilución lateral.

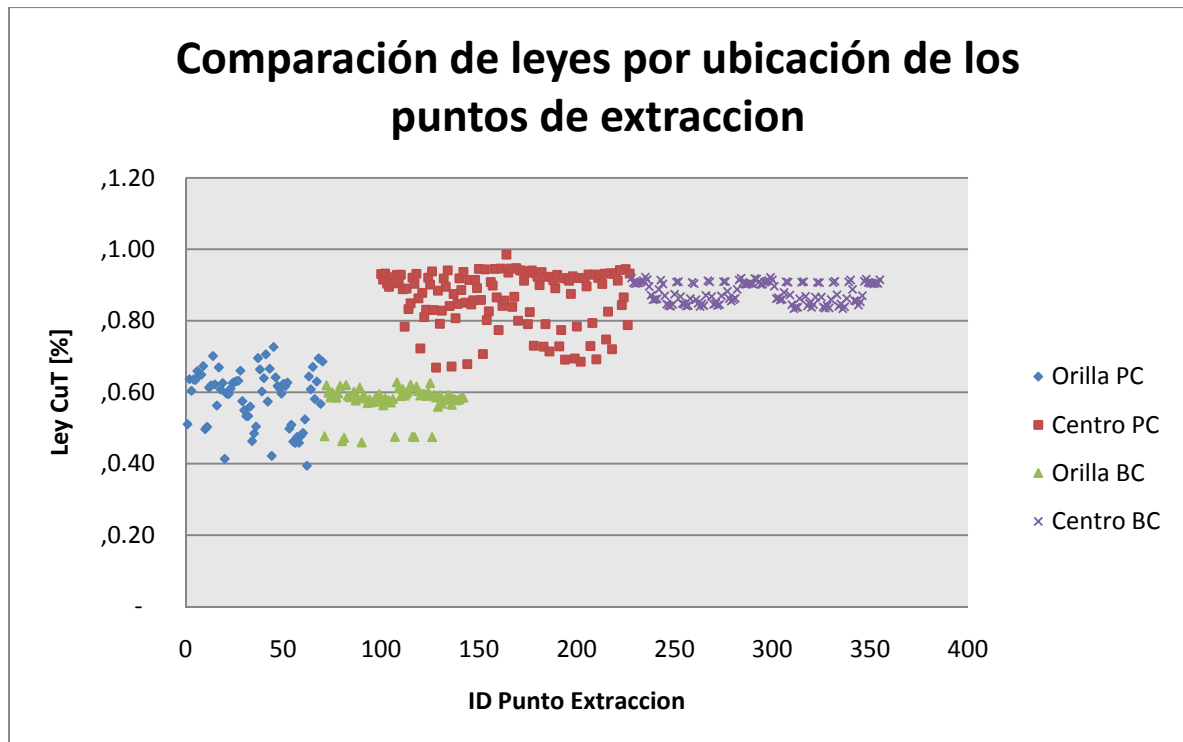


Figura 6.19. Comparación de leyes por ubicación de puntos de extracción.

De la figura se aprecia que los puntos de extracción correspondientes a la parte externa tienen una ley considerablemente menor versus los puntos ubicados en el centro. Adicionalmente se aprecia una diferencia en la varianza, el método de Block Caving tiende a mostrar una mayor variabilidad en las leyes que en el Panel Caving. En la siguiente tabla se verifican las tendencias de la figura.

Tabla 6.10. Diferenciación de ley entre los puntos centrales versus puntos externos.

Ubicación	Ley [%]	Desv. Est. [%]	$\Delta$ Relativo Cent
Centro PC	0.87	0.08	0.7%
Centro BC	0.88	0.03	-0.7%
Externo PC	0.59	0.08	32.7%
Externo BC	0.58	0.04	33.9%
Centro Tot.	0.87	0.06	0.0%
Externo Tot	0.58	0.06	33.3%

El detalle de estos resultados se puede expresar en un mapa diferenciando las pruebas de Panel Caving con las de block Caving.

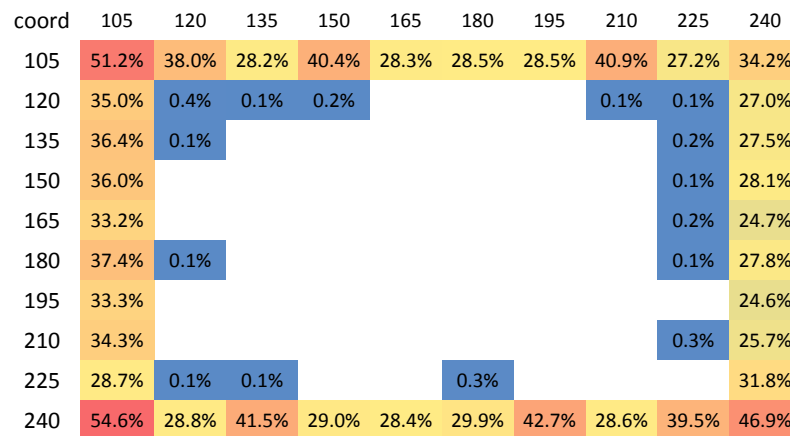


Figura 6.20. Porcentaje de dilución lateral en los puntos de extracción Panel Caving.

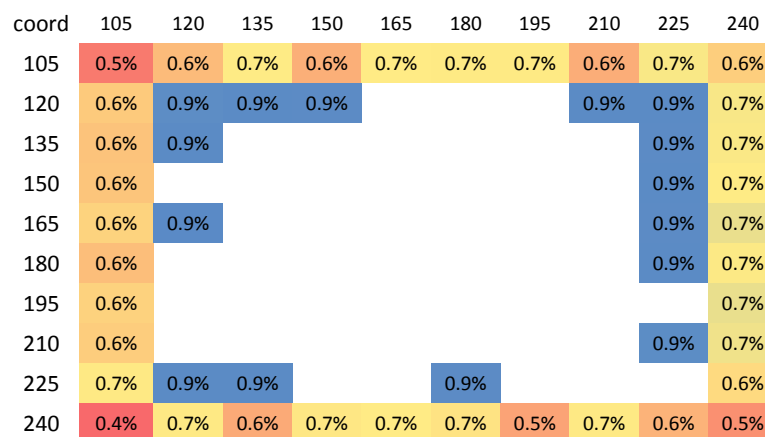


Figura 6.21. Mapa de leyes considerando la dilución lateral por punto de extracción en Panel Caving.

Del los dos mapas anteriores se puede apreciar la influencia de la dilución lateral. Afecta prácticamente sólo los puntos externos (marcados en color), diferenciándose para efectos del

estudio entre puntos laterales y esquinas. A continuación se muestran los resultados para las pruebas de Block Caving.

coord	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240
105	51%	39%	39%	41%	45%	29%	40%	43%	39%	57%
120	34%	0%					0%	0%	0%	39%
135	35%	0%							0%	40%
150	34%									40%
165	26%								0%	31%
180	42%	0%							0%	42%
195	36%								0%	38%
210	36%									35%
225	32%	0%		0%	0%					33%
240	50%	36%	38%	38%	46%	26%	37%	37%	37%	51%

Figura 6.22. Porcentaje de dilución lateral en los puntos de extracción Panel Caving.

coord	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240
105	0.5%	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%	0.7%	0.6%	0.5%	0.6%	0.4%
120	0.6%	0.9%	0.9%	0.9%				0.9%	0.9%	0.6%
135	0.6%	0.9%							0.9%	0.6%
150	0.6%								0.9%	0.6%
165	0.7%	0.9%							0.9%	0.7%
180	0.5%								0.9%	0.5%
195	0.6%									0.6%
210	0.6%								0.9%	0.6%
225	0.6%	0.9%	0.9%			0.9%				0.6%
240	0.5%	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%	0.7%	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%

Figura 6.23. Mapa de leyes considerando la dilución lateral por punto de extracción en Block Caving.

De los dos mapas anteriores se aprecia la misma tendencia que en Panel Caving donde los puntos más afectados corresponden a los que tienen mayor área de contacto con dilución. La contribución de dilución lateral a los puntos que se encuentran dentro del bloque o panel (representados por muy bajos porcentajes en azul) no tienen una incidencia en el cálculo de reservas. Las diferencias relevantes se encuentran en los puntos adyacentes al material correspondiente a la dilución lateral. A continuación se presentan dos tablas para comparar los resultados de la dilución lateral en block y panel caving.



Tabla 6.11. Comparación de la dilución lateral en puntos externos laterales.

	Puntos Externos Laterales		
	PC	BC	Dif. Rel
Total Finos In-Situ	45722	45722	
Total Finos Hor-Mix	31149	28809	7.5%
Dif. Rel	31.9%	37.0%	13.8%

Tabla 6.12. Comparación de la dilución lateral en puntos externos esquinas.

	Puntos Externos Esquinas		
	PC	BC	Dif. Rel
Total Finos In-Situ	5715	5715	
Total Finos Hor-Mix	3045	2743	11.0%
Dif. Rel	46.7%	52.0%	11.3%

De las tablas anteriores se llega a la conclusión que la incidencia de la dilución lateral está determinada principalmente por los puntos externos, de los cuales los que tienen mayor dilución lateral son los puntos esquinas. Para los puntos laterales se observa que en el caso de Panel Caving, la influencia llega cerca del 32% y para Block Caving 37% teniendo un 13% más dilución lateral que Panel Caving. Esta diferencia, se puede explicar en términos de flujo gravitacional, debido a que las áreas abiertas en block caving corresponden a sectores mucho más grandes en comparación con Panel Caving. Cuando se abren grandes áreas en lugar de una apertura continua de puntos como sucede en Panel Caving, se puede generar mayor cantidad de rilling y espacios mayores para la incorporación de material que se encuentra alrededor del punto o zona de extracción.

En el caso de los puntos esquinas, la influencia de la dilución lateral es sobre 46% siendo mayor en Block Caving, un 11% más con respecto a Panel Caving. Si se trata de un secuenciamiento tipo Panel Caving se debería esperar un castigo en ley si se considera la dilución lateral del orden de un 30% considerando la ley del sector lateral. Para el ejemplo, la dilución lateral se considera un material de 0% de ley con el fin de verificar las diferencias, naturalmente esto no ocurre en un caso real donde las diferencias de leyes son graduales. En ese caso, la estimación también sirve considerando el porcentaje de entrada de dilución lateral por sectores adyacentes a la mina como lo muestra la tabla 6.5. Naturalmente esta diferencia puede ser menos considerable cuando se trabaja sobre una mina de mayores dimensiones, considerando que el estudio se basa en un área de extracción de 22.500 m<sup>2</sup>. También dependerá de la geometría de la mina, lo que se puede expresar con el radio hidráulico, ya que si la geometría de la mina tiene mayor perímetro, mayor será el castigo sobre el valor total de reservas del yacimiento.

Por lo tanto, considerando la dilución horizontal se puede llegar a la siguiente expresión.

$$Reservas [ton finos] = Finos_{DP\ internos}[ton] + Finos_{DP\ externos}[ton] * (1 - \%Dil) [26]$$

De la expresión, hay que considerar la ley del material diluido y se tendrán los siguientes casos:

- Panel Caving: %Dil = 32%
- Block Caving: %Dil = 37%

#### 6.4. Resultados Estudio 3

En esta sección se estudiará en forma conjunta los efectos que tienen la dilución vertical y horizontal como un modelo de mezcla integrado. Para eso se ocuparán los resultados anteriores obtenidos para la mezcla horizontal y vertical. Con esto se pretende cuantificar si existe una diferencia real en los mecanismos de mezcla cuando se comparan en función de la secuencia de extracción. Como se determinó en el punto 6.2, no existen diferencias mayores en los tipos de secuencia de Panel Caving, sin embargo, considerando las pruebas de Panel versus Block Caving, sí hubieron diferencias considerables. Para el caso de la mezcla horizontal estudiada en el punto 6.3 también se encontraron diferencias importantes dependiendo el método de secuenciamiento, pero tampoco hubo diferencias notables entre los distintos tipos de secuencia de Panel Caving.

En este punto se analizarán las secuencias considerando la hundibilidad de todos los sectores (incluyendo los sectores laterales a la zona mineralizada) y verticales. Con esto, finalmente se pretende tener un estudio detallado en función de los tipos de mezcla que pueden ocurrir en el fenómeno del Caving.

A continuación se muestran los reportes de extracción para las 7 pruebas en estudio. Estas pruebas se realizaron en las mismas condiciones que las dos anteriores, los mismos parámetros de entrada y el mismo ritmo de producción (9.000 tpd). De los gráficos se ve en barra azul la cantidad de tonelaje extraído por periodo (mes) con el detalle en el eje izquierdo mientras que la ley y la dilución está representada por las líneas rojas y verdes respectivamente. Los valores para ambas variables están en términos de porcentaje. Para efectos de resumir los resultados en un solo gráfico la dilución presentará valores entre 0 y 1% lo que en realidad debiera ser entre 0 a 100%, lo que significa a modo de ejemplo que si en un cierto periodo la curva de dilución arroja un valor de 0.4% significa que un 40% de la composición del mineral en ese periodo corresponde a dilución. La ley está en porcentaje real. Los resultados de la producción por pruebas se muestran a continuación.

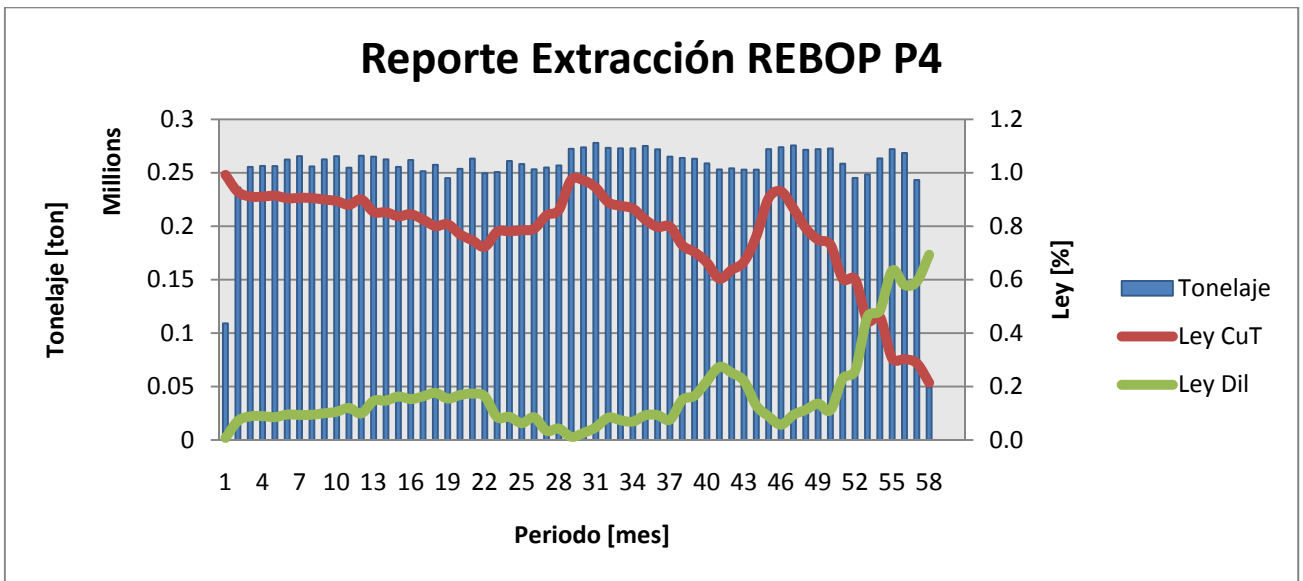


Figura 6.24. Reporte Extracción P4.

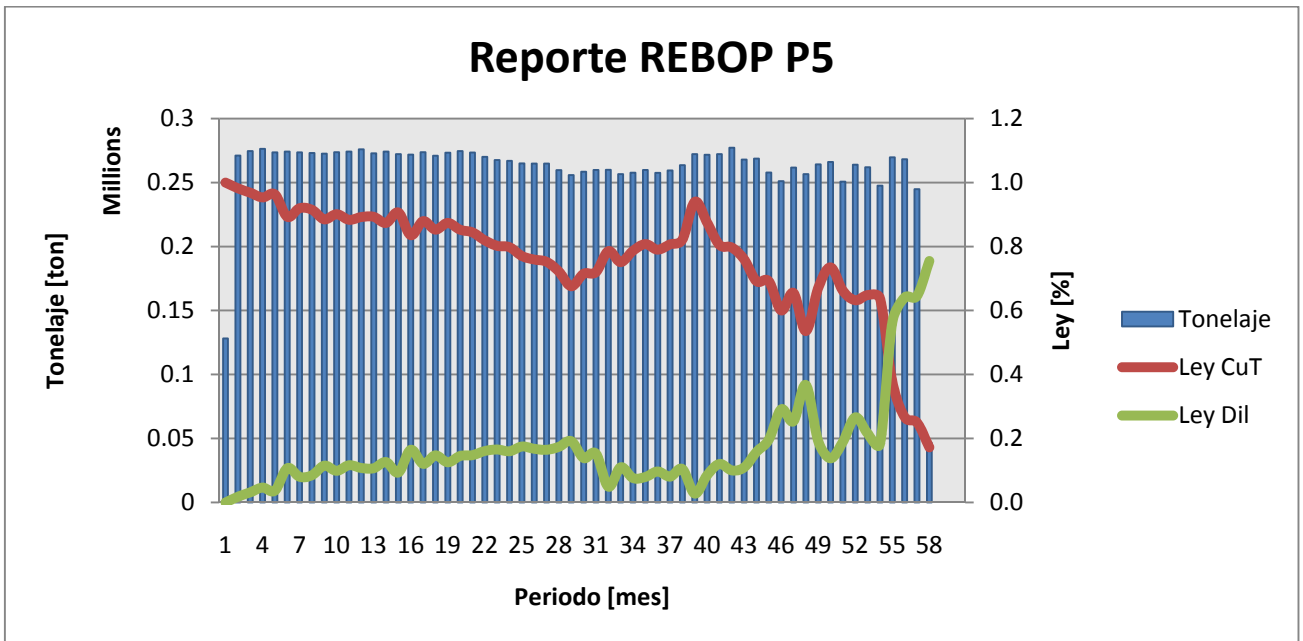


Figura 6.25. Reporte Extracción P5

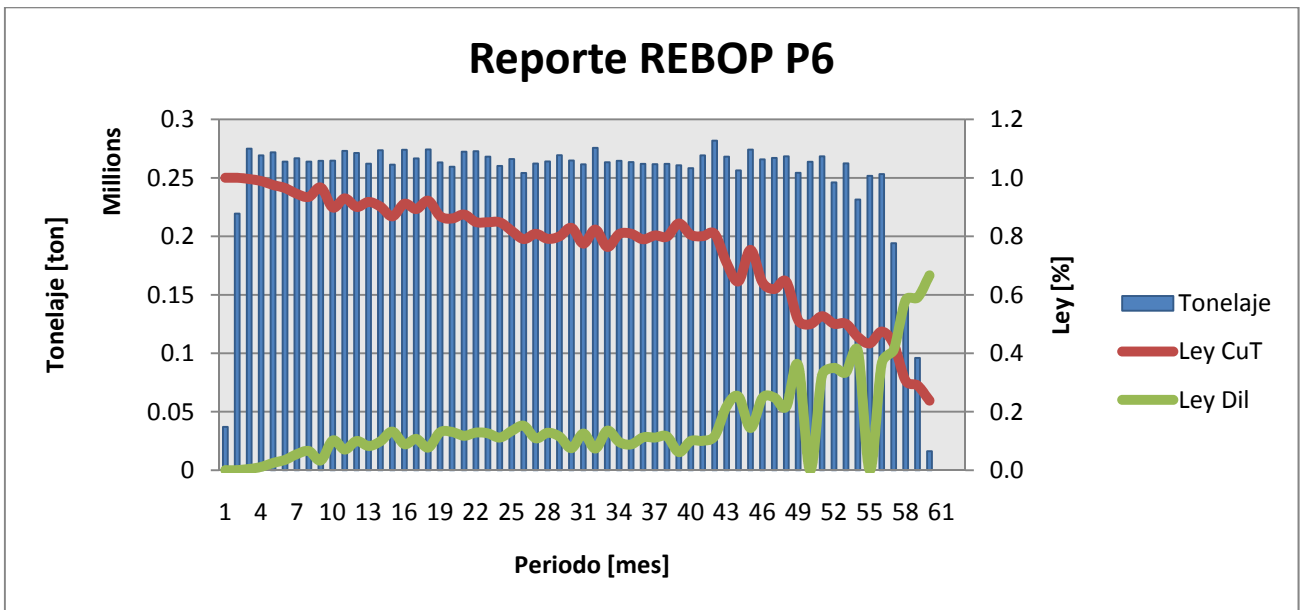


Figura 6.26. Reporte Extracción P6.

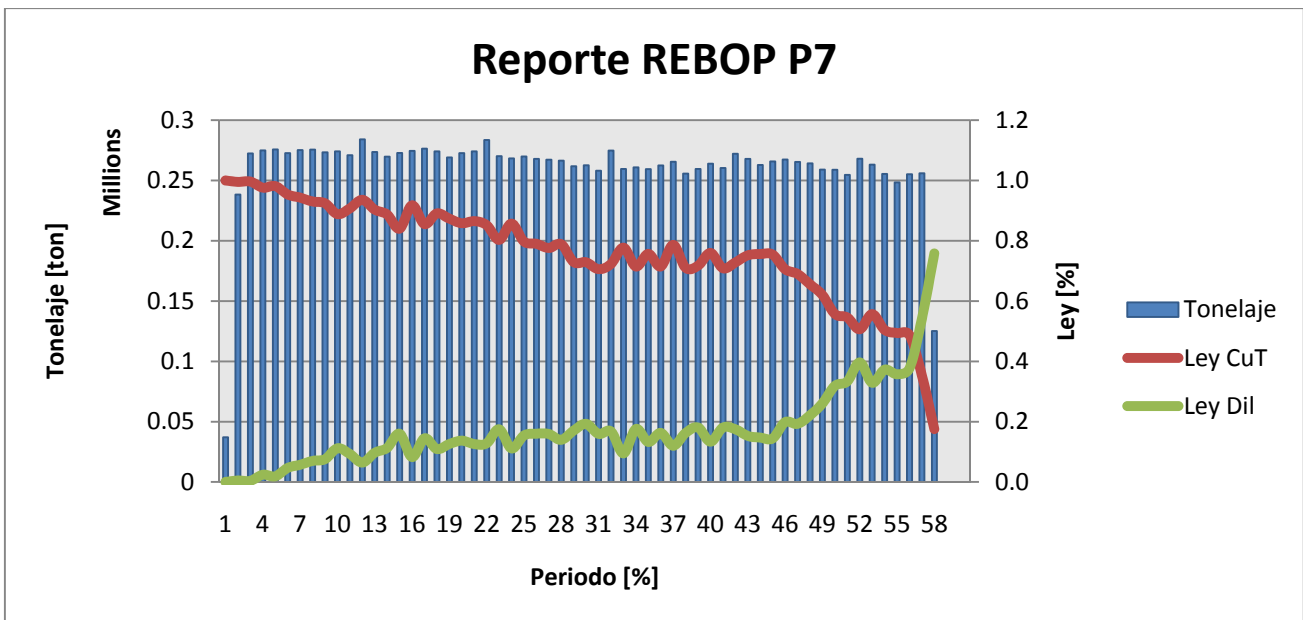


Figura 6.27. Reporte Extracción P7.

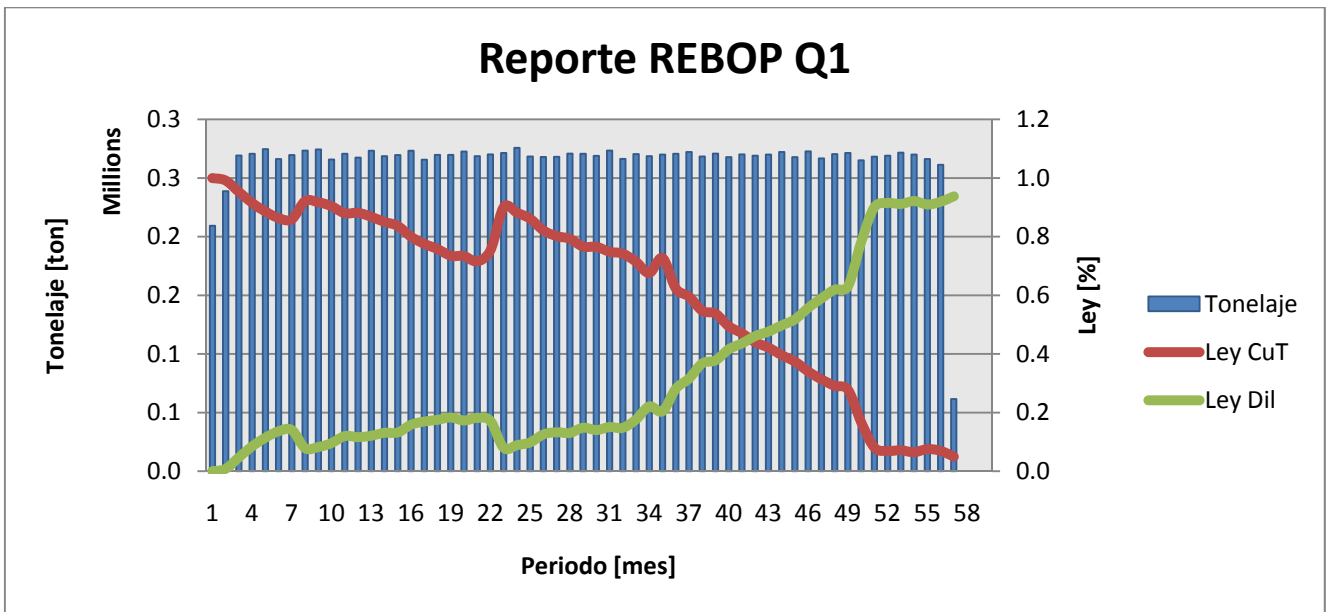


Figura 6.28. Reporte Extracción Q1.

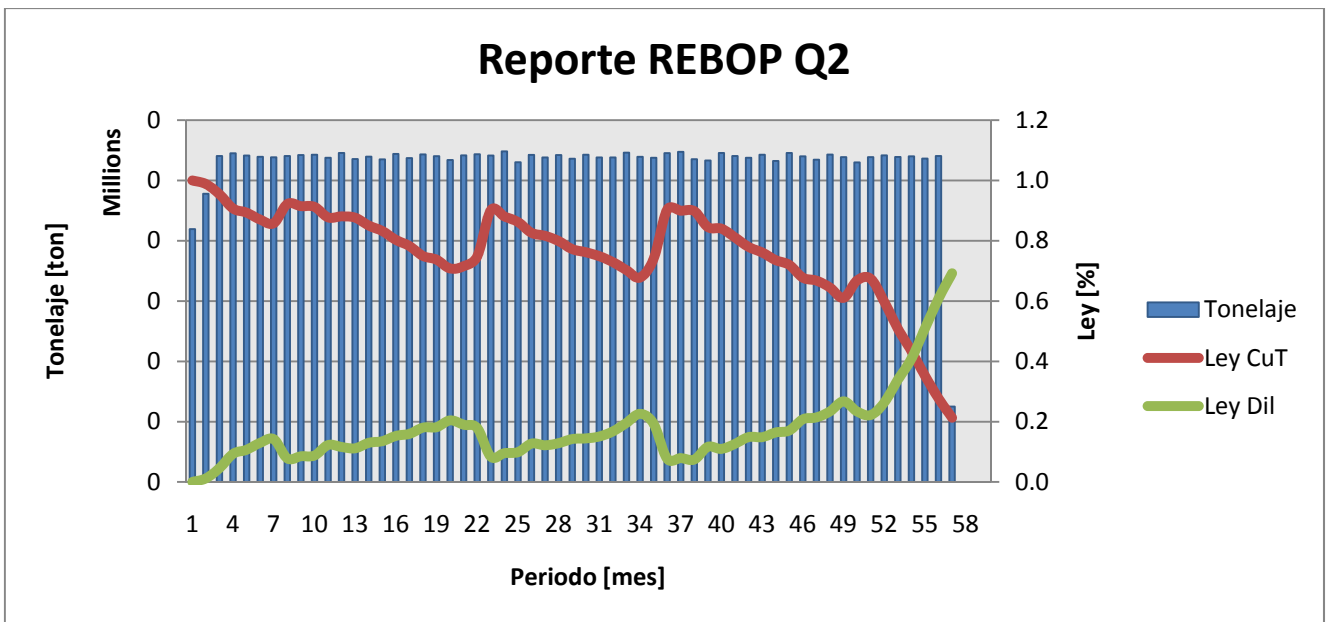


Figura 6.29. Reporte Extracción Q2.

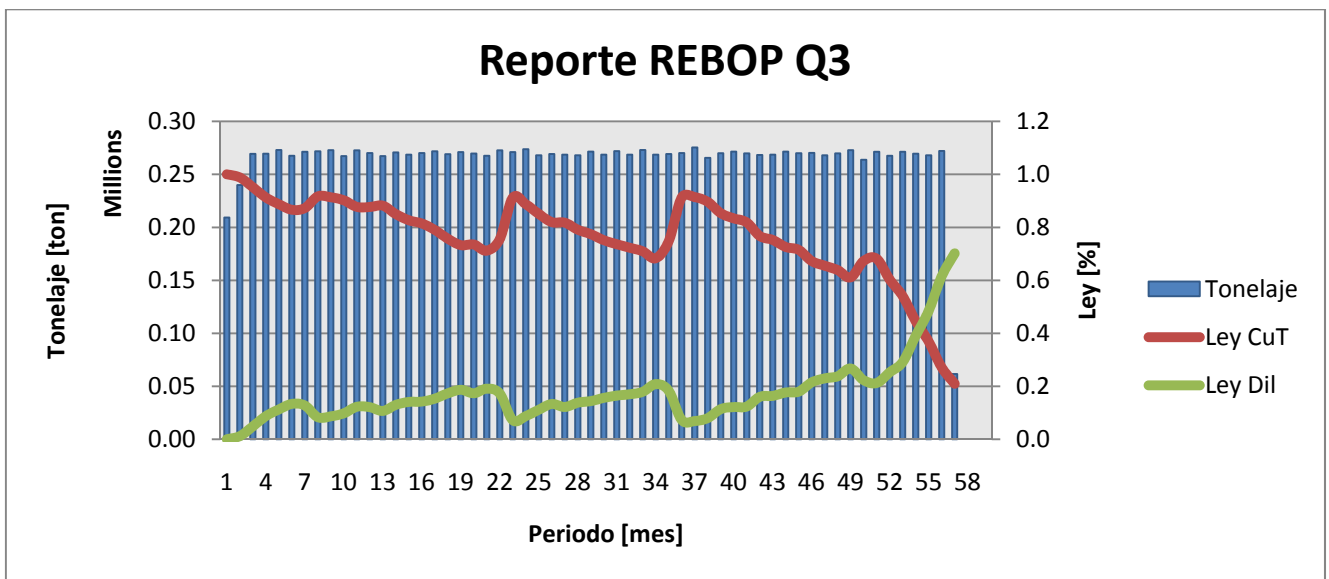


Figura 6.30. Reporte Extracción Q3.

De los reportes de extracción se puede ver que tanto el perfil de leyes como la dilución están fuertemente marcados por la secuencia. En el caso de las pruebas de Panel Caving (Pruebas P) se nota un comportamiento más errático en el perfil de leyes y la dilución. Este resultado es esperable considerando que la apertura y cierre de puntos, tanto laterales como en el interior del layout se hace de forma continua. El caso del Block Caving es diferente y se aprecia en los gráficos. Los perfiles de leyes y de dilución van acorde al secuenciamiento, ya que a medida que se va extrayendo un bloque, las leyes tienden a la baja mientras que la dilución tiende al alza hasta que se abre un bloque nuevo, hay un salto drástico en el alza de las leyes por estar extrayendo material cercano al punto de extracción mientras que la dilución toma un salto drástico a la baja conformando una geometría de “serrucho” tanto en el perfil de leyes como en la dilución. De todas maneras, estos máximos en la alza los casos del Block Caving cada vez tienen un menor valor mientras que los máximos de la dilución tienen un mayor valor a medida que se avanza en la extracción de la mina. Los resultados obtenidos de la extracción para estas simulaciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.13. Resultados de extracción por prueba.

Prueba	Tonelaje [ton]	Finos [ton]	Ley [%]	PED [%]
P4	14,792,008	115,185	0.779%	2.3%
P5	15,089,303	117,059	0.776%	9.9%
P6	14,992,473	116,826	0.779%	10.7%
P7	15,090,278	116,121	0.770%	9.1%
Q1	15,076,204	95,588	0.634%	6.6%
Q2	15,091,154	116,177	0.770%	6.6%
Q3	15,091,439	116,355	0.771%	6.5%

De la tabla, nuevamente no se pueden observar diferencias considerables para determinar si existe una relevancia en cuanto a la forma de la secuencia de extracción de Panel Caving. Sin embargo, nuevamente se notan las diferencias estudiadas en los puntos anteriores para comparar el Panel Caving con el Block Caving. Esta diferencia es más apreciable en la siguiente tabla resumen.

Tabla 6.14. Resumen de extracción para Block/Panel Caving.

	Ley [%]	PED [%]
P	0.776%	8.0%
Q	0.725%	6.6%
Dif. Rel	7.0%	21.7%

La diferencia entre Block y Panel Caving en cuanto a ley es de un 7% considerando la mezcla horizontal y vertical. La diferencia con planificar según el método de pre-mezcla es aún mayor, ya que para los mismos parámetros técnico-económicos, la ley media extraída es de un 0.84%, lo que según los resultados, es un 8.25% mayor que las leyes para un Panel Caving y un 15.8% mayor que Block Caving. Esto es una diferencia significativa, ya que comprende una gran baja en las reservas si se consideran como tal, las determinadas según el modelo de pre-mezcla.

Con respecto a la dilución y los bajos valores para la entrada de esta, de acuerdo a los estudios anteriores se puede afirmar que esta, corresponde a la dilución lateral, principalmente reportada para los puntos externos de la mina. A continuación se presenta una tabla resumen considerando lo anteriormente expuesto.

Tabla 6.15. Comparación de reservas según método de secuencia.

	Finos [ton]	Ley [%]	PED Vert. [%]	PED Hor. [%]
In-Situ	146,711	0.947%	-	-
Pre-Mezcla	127,493	0.845%	40%	-
Panel Caving	116,151	0.770%	49%	8.0%
Block Caving	108,578	0.720%	41%	6.6%

Esta tabla considera los resultados obtenidos para la dilución lateral en los puntos externos y la dilución vertical. De la tabla se puede ver claramente diferencias en cuanto a estimación de leyes, entradas de dilución, tanto verticales como horizontales y en la cantidad de finos obtenidas. Para verificar estas diferencias con mayor detalle se entregan dos matrices de diferencias relativas entre la Pre-Mezcla (resultados de MSBPC, independiente de la secuencia) y los resultados para Panel y Block caving.

Tabla 6.16. Matriz de diferencias relativas entre Block/Panel y Pre-Mezcla para finos.

Matriz de Diferencias Relativas en Finos			
	Pre-Mezcla	Panel Caving	Block Caving
Pre-Mezcla	-	9.8%	17.4%
Panel Caving	9.8%	-	7.0%
Block Caving	17.4%	7.0%	-

Tabla 6.17. Matriz de diferencias relativas entre Block/Panel y Pre-Mezcla para leyes.

Matriz de Diferencias Relativas en Leyes			
	Pre-Mezcla	Panel Caving	Block Caving
Pre-Mezcla	-	12.1%	17.4%
Panel Caving	12.1%	-	7.0%
Block Caving	17.4%	7.0%	-

De las tablas es más claro apreciar las diferencias, lo más relevante es observar la diferencia relativa entre Panel y Block Caving, considerando la mezcla vertical y horizontal, es de 7%, traspasándolo a tonelaje en finos, toma un valor considerablemente menor. El caso de la premezcla siempre sobrestima el valor de las leyes diluidas, lo que si se compara con el caso del Block Caving, esta diferencia es aún más grande (17.4%). En los dos casos (Panel y Block Caving) las reservas tienen que ser necesariamente reevaluadas. Es por esta razón que se propone esta metodología en la cual, mediante simulaciones, se verifiquen las reservas considerando la secuencia de extracción. Si bien, no existen diferencias notables para las diferentes secuencias de Panel Caving, sí lo hay entre Panel y Block Caving. La variabilidad en el Block Caving también es mayor por lo que se debería, como paso fundamental, estimar un nuevo modelo de reservas que considere la secuencia como variable para la determinación de estas.

De modo conceptual, estos dos tipos de mezcla se pueden presentar de modo análogo al modelo de mezcla vertical presentado por Laubscher, pero considerando según el modelo de flujo gravitacional, la incidencia de la mezcla horizontal como resultado posterior a las simulaciones. A continuación se muestra el gráfico propuesto que incorpora la dilución lateral (figura 6.31).



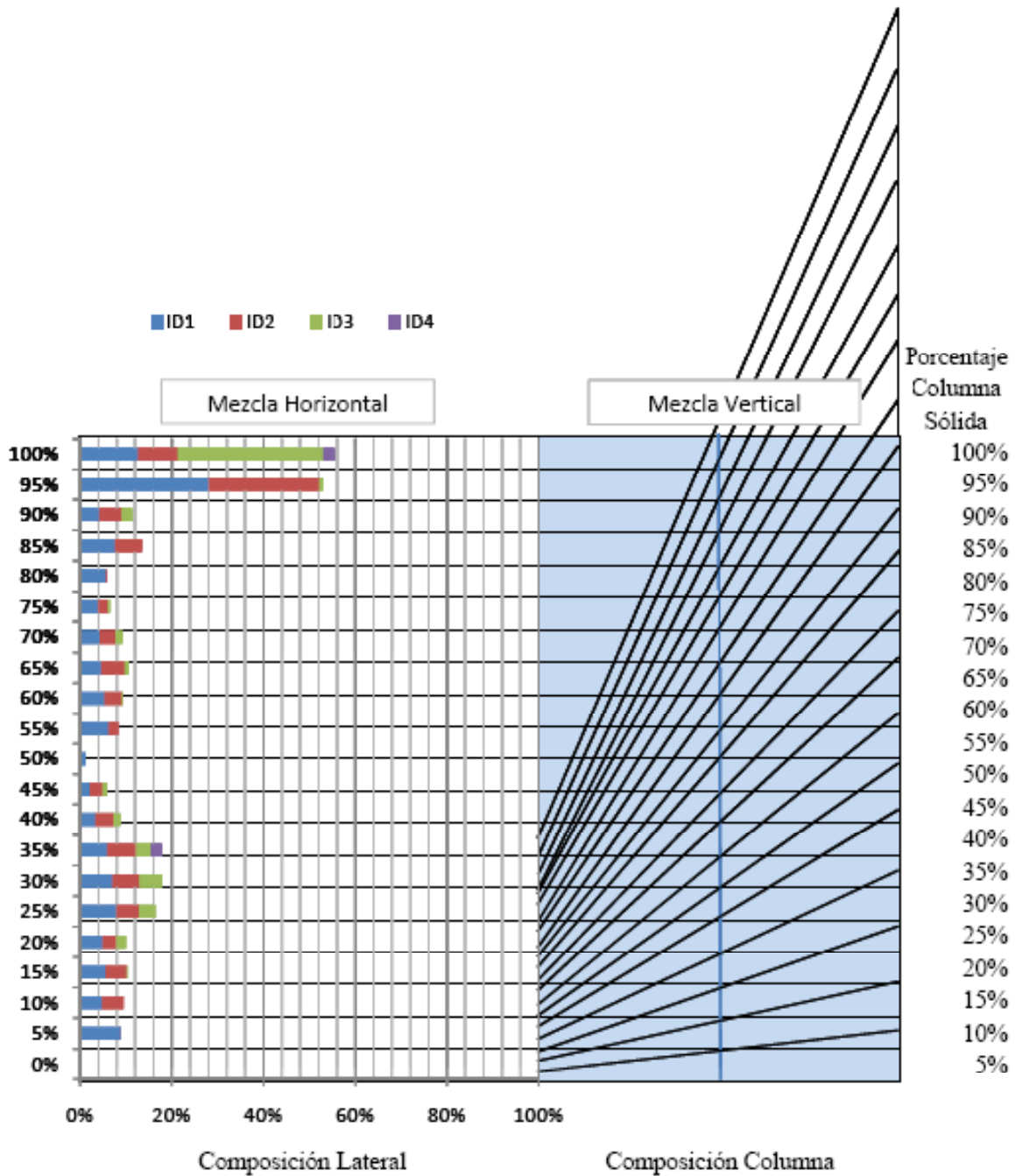


Figura 6.31. Modelo de mezcla considerando dilución horizontal.

De la figura se aprecia que la parte celeste, corresponde a la columna de mineral, que se debe extraer con sus líneas respectivas representando la dilución vertical generada por las matrices de mezcla mostradas anteriormente. El cálculo de la dilución vertical se hace de la misma forma que para el gráfico tradicional del modelo de Laubscher. La segunda parte, (izquierda) representa la mezcla ocurrida por la dilución horizontal de acuerdo a los sectores de contorno de la envolvente económica (ID1, ID2, ID3 e ID4 respectivamente) en altura. Se consideran en este caso, que cada uno de estos sectores tiene un ancho de 7.5 metros (la mitad de un bloque del modelo). La

incidencia de la dilución lateral está representada por las barras de color, considerando, según los estudios, cerca de un 6% correspondiente al primer sector (ID1), 5% al sector 2 (ID2) y así sucesivamente hasta el sector ID4. También se puede apreciar que el esquema plantea la procedencia en altura de la mezcla vertical. Por otro lado, de acuerdo al modelo volumétrico de Laubscher, se define un punto de entrada de dilución para la mezcla vertical (40 % en este ejemplo), también existe un punto de entrada de dilución horizontal que se muestra, según el porcentaje de columna in-situ. Para este caso, la dilución horizontal entre al 5% de extracción de la columna sólida y representa cerca de un 8% adicional de material de ID1. A continuación se muestra una aplicación del gráfico considerando que se necesita saber la cantidad de reservas para un 20% de la columna sólida.

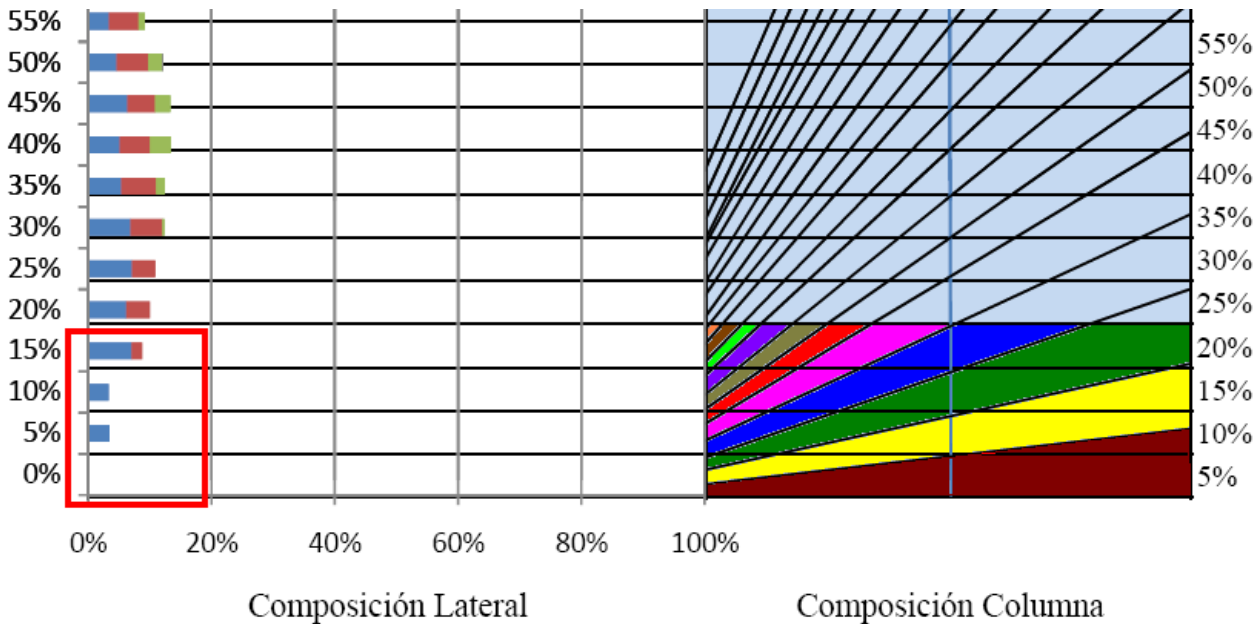


Figura 6.32. Gráfico de mezcla ampliado a un 20% de columna sólida.

En este caso, está representada la extracción de un 20% de la columna sólida en la cual, la parte derecha (mezcla vertical) muestra en colores la composición de cada una de las capas verticales para un 20% de extracción considerando un PED de 40%. En este caso, son 10 las capas que contribuyen verticalmente para la columna sólida, las cuales están representadas en colores. Por lo tanto, para el cálculo del modelo diluido verticalmente, se hace el mismo cálculo de ley por área ponderada que en el caso de Laubscher. Por otra parte, en el lado izquierdo, se aprecia la cantidad de material estéril que se integra adicionalmente a la columna sólida. Al 10% de extracción, entra la dilución vertical, de la cual, se integra un 4% adicional de estéril asociado al sector ID1, al 15% de extracción, se le agrega un 3% adicional del sector ID1, y al 20% de extracción, se le agrega un 11% de material estéril de ID1 y 3% adicional del material ID2.

### 6.5. Revalorización del modelo

Como se explicó inicialmente mediante el diagrama de la metodología, la idea es luego de obtener las matrices de mezcla para el modelo, diluir el modelo in-situ de acuerdo a la secuencia de extracción. Como se vió en los puntos anteriores, la diferencia entre las distintas secuencias de Panel Caving son insignificantes por lo que se definirá un modelo distinto para Block y Panel caving, generalizando este tipo de secuencias.

Se definen perfiles de leyes en altura dependiendo si la columna es interna-externa o si particularmente pertenece a una esquina de la mina. Luego se genera la metodología de BHOD para estimar la altura óptima de acuerdo al modelo económico inicialmente entregado. A continuación se muestran dos gráficos de BHOD para Panel y Block Caving respectivamente.

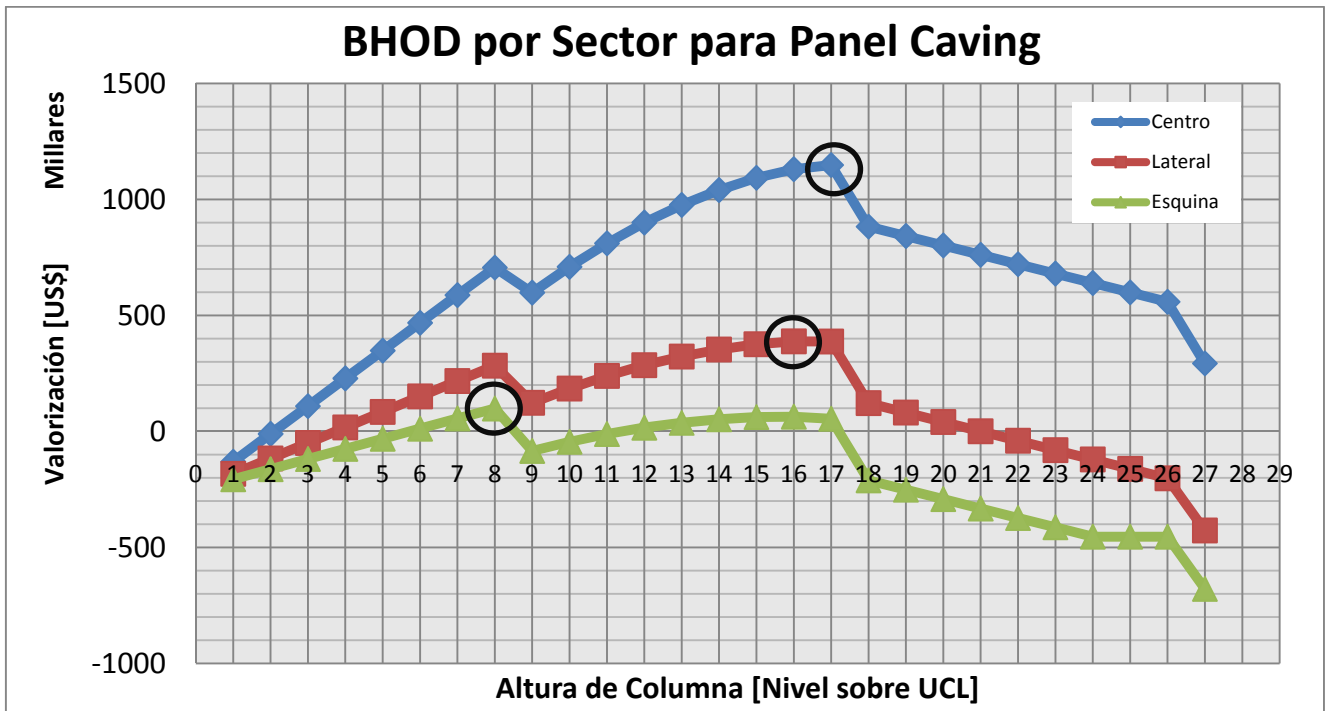


Figura 6.33. Valorización Acumulada por sector para Panel Caving.

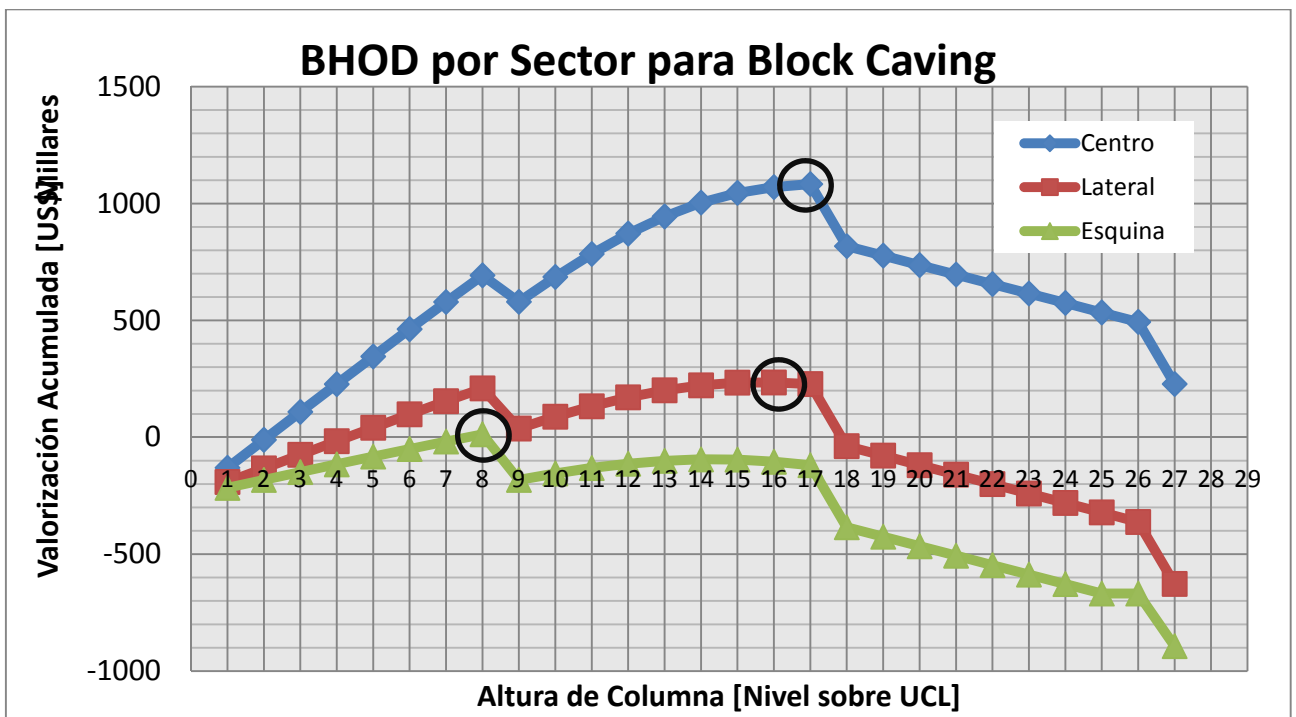


Figura 6.34. Valorización acumulada por sector para Block Caving.

Ambos gráficos tienen los mismos resultados correspondientes al nivel de cada columna. Es decir, para el caso de las columnas que se encuentran en las esquinas, estas llegan al nivel 8, para el caso de las columnas laterales, estas llegan al nivel 16 y para el caso de las columnas centrales, tienen la misma altura calculada en un principio por el modelo de mezcla. Estas diferencias se basan principalmente por la incorporación de la dilución lateral. De acuerdo a los resultados obtenidos, los puntos centrales no tienen dilución lateral por lo que su comportamiento debiera ser muy similar al establecido por el modelo de pre-mezcla, mientras que las mayores diferencias están, tal como se aprecia, en los puntos laterales. Si bien, la valorización económica define que las columnas que se encuentran ubicadas en las esquinas tienen una altura bastante menor, existen criterios geomecánicos para que eventualmente estas columnas a pesar de no obtener mayores beneficios, se les suba su altura, lo que correspondería al suavizamiento de estas. La nueva envolvente económica tendrá la siguiente forma conceptual.

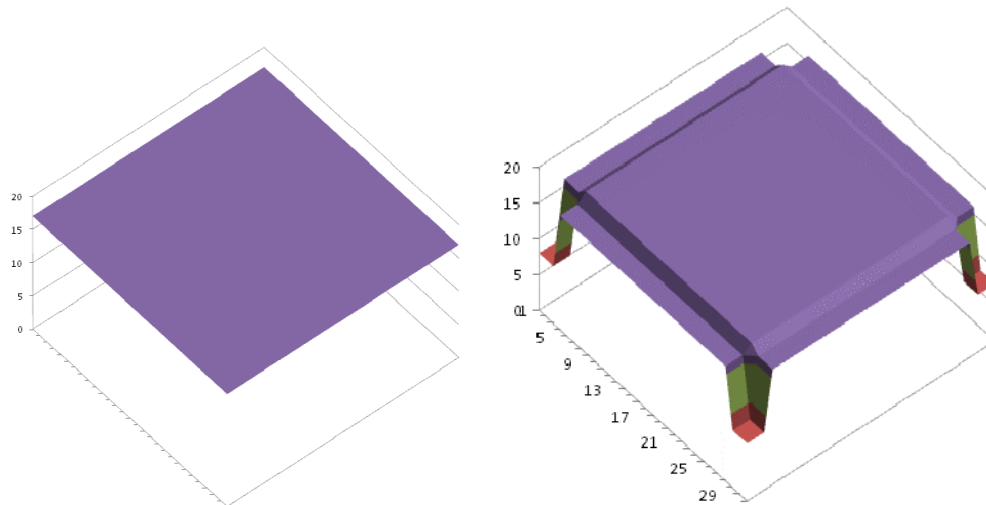


Figura 6.35. Techo de columnas con dilución vertical y considerando flujo horizontal. Inicial (Izquierda) y revalorizado (Derecha).

De esta envolvente económica, se rescatan los siguientes resultados.

Tabla 6.18. Reservas revalorizadas por BHOD.

Reestimación de Envolvente Económica para Block y Panel Caving							
	Ton Centro	Ton Lateral	Ton Esquina	Ley Centro	Ley Lateral	Ley Esquina	Finos Totales
	[ton]	[ton]	[ton]	[%]	[%]	[%]	[ton]
Panel	150869	142769	72904	0.869%	0.609%	0.540%	113,326
Block	150869	142769	72904	0.845%	0.550%	0.475%	108,113

Estas reservas están consideradas según la geometría del yacimiento, es decir, de los 100 puntos de extracción, 64 corresponden a puntos centrales, 32 a puntos laterales y 4 a puntos esquinas. En este caso, dada la distribución de leyes in-situ, los niveles entre Block y Panel Caving terminaron siendo los mismos por ubicación de puntos de extracción pero esto naturalmente puede variar de acuerdo a cada yacimiento así como la incidencia de los puntos laterales dentro de todo el modelo ya que mientras menos puntos laterales se tenga, mayor será la similitud con el modelo que sólo involucra la mezcla vertical. De la tabla se aprecia que la revalorización de reservas entrega una cantidad de finos para Panel Caving 4.8% mayor que para Block Caving. A continuación se hace una evaluación económica considerando flujos constantes con tasa de interés anual de 10% pasada a tasa mensual ya que los planes están calculados a esa escala de tiempo. En el siguiente gráfico y tabla se entrega como resultado final, la valorización por periodo antes y después de revalorizar la envolvente económica para los dos métodos de explotación.

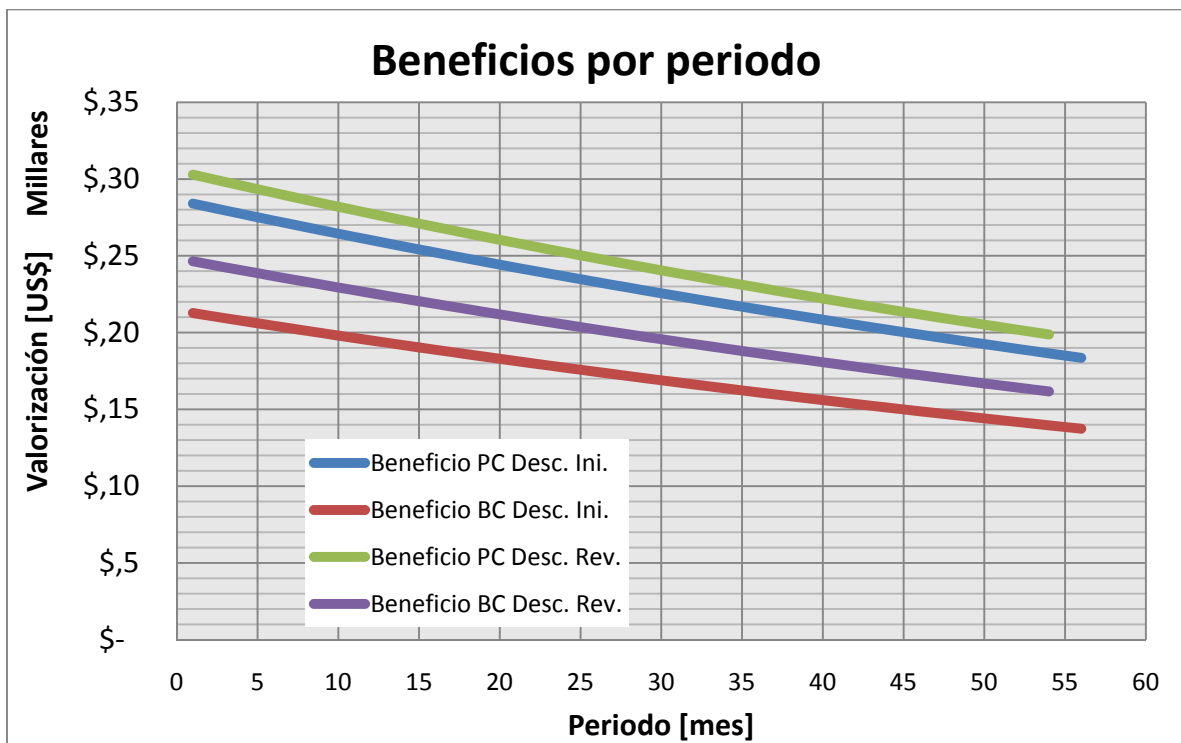


Figura 6.36. Beneficios por periodo antes y después de la revalorización.

Tabla 6.19. Resultados de VAN operacional antes y después de la revalorización.

VAN Op.	PC	BC
Inicial	\$ 1,289,141	\$ 965,460
Revalorizado	\$ 1,335,316	\$ 1,086,252
Dif. Relativa	3.6%	12.5%

De la tabla y el gráfico se puede apreciar que el VAN operacional (no se incluye inversión para efectos comparativos) muestra una mejora de 3.6% para la revalorización cuando se trata de una secuencia tipo Panel Caving y de un 12.5% cuando se considera una secuencia tipo Block Caving en comparación a la valorización con la envolvente económica inicial, con una menor cantidad de finos.

De estos resultados, se puede aseverar que la secuencia sí incide en la mezcla, en el caso de Block Caving, la mezcla horizontal y vertical incide por la naturaleza del método, que requiere abrir de forma discreta áreas mayores. En el caso del Panel Caving, la revalorización mostró que la incidencia no es tan significativa (3.6% de diferencia en el VAN Operacional). También se pudo demostrar que con la herramienta de flujo gravitacional no se aprecian grandes diferencias entre las diferentes tipos de secuencia en Panel Caving por lo que no se pudo establecer un patrón de mezcla de acuerdo al secuenciamiento en este caso.

Los resultados también afirman que la metodología utilizada por mucho tiempo para la estimación de reservas en las minas de Block y Panel Caving genera sobreestimación de finos, lo que finalmente radica en llegar a conclusiones erróneas para las evaluaciones económicas,

específicamente en la etapa de establecer un modelo diluido basándose en una herramienta de pre-mezcla pensada inicialmente para minería de Block Caving. Es por esta razón que se busca establecer una metodología que utilice las nuevas herramientas disponibles para modelar el problema del flujo gravitacional con la idea de obtener resultados más acordes con la realidad basándose en la mecánica del caving. Si bien, en este caso se implementó la metodología para una mina en particular, la realización de las etapas son equivalentes y deberían dar resultados relevantes para la planificación de largo plazo en minería de Block/Panel Caving ya que el problema de flujo sigue siendo el mismo, con la adición de validar las variables que contiene REBOP para llegar a resultados acorde a cada mina. Una vez validado el modelo, se procede a ejecutar la metodología para verificar las diferencias de acuerdo a la secuencia de extracción la cual se mostró ser efectiva.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El trabajo realizado tiene la finalidad de generar una metodología en la cual se puede estimar las reservas extraíbles en función de la secuencia de extracción para los métodos de hundimiento Block y Panel Caving. De acuerdo a este objetivo, se trabajó con un software de planificación de largo plazo (MSBPC) el cual utiliza el modelo volumétrico de mezcla vertical de Laubscher y un software de modelación del flujo gravitacional (REBOP). La primera etapa corresponde a estimar las reservas para una mina de acuerdo al modelo de pre-mezcla, generando un modelo diluido y luego la estimación de la altura de columnas lo cual entrega como producto final las reservas extraíbles iniciales. Para generar este modelo se tuvo que revisar la implementación de las metodologías que realiza el software para cada etapa de planificación, desde la generación del modelo de recursos hasta la entrega del plan de producción. El objetivo en esta etapa es determinar si cada paso está correctamente implementado y conocer las restricciones asociadas al programa que determinen un modelo de estudio.

### 7.1. Validación de MSBPC

El software inicialmente trabaja con un modelo de recursos que no incorpora la geometría de puntos de extracción. Esto significa que el modelo no es re-bloqueado en función de las áreas de influencia de los puntos de extracción lo que se transforma en una de las principales limitantes para generar el modelo en estudio. Se tuvo que generar un modelo de puntos de extracción con la geometría de los bloques del modelo. Las dimensiones de la malla es de 15x15 m. lo que corresponde a las dimensiones de los bloques del modelo de recursos. El modelo se inicializa con variables de densidad, ley, tipo de roca y adicionalmente se incorpora una variable de hundibilidad que en la generación del plan de producción está relacionada con las tasas de producción.

La próxima etapa corresponde a la generación del modelo diluido. MSBPC utiliza el algoritmo volumétrico de mezcla vertical de Laubscher por lo que se procedió a comparar la mezcla realizada por el software con la implementación probada del algoritmo de Laubscher en Matlab. A MSBPC se le entrega como parámetro de entrada el nivel de hundimiento, el modelo de recursos in-situ y el punto de entrada de dilución (PED). Se realizaron pruebas para distintos PED que arrojaron resultados iguales para MSBPC y la implementación en Matlab por lo que de esta etapa se concluye la correcta realización del procedimiento.

La etapa siguiente define la altura para cada columna del modelo diluido. MSBPC calcula la altura para cada columna del modelo según la metodología de “*Best Height of Draw*” que corresponde a determinar el nivel en el cual se obtenga el mayor beneficio acumulado en función de un modelo económico incorporando costos de desarrollo y mantención por punto.

En la próxima etapa se suavizan las alturas con el fin de operativizar la envolvente económica determinada en el punto anterior, lo cual el software lo realiza de forma correcta. Permite definir tres estrategias que corresponden principalmente a si se desea maximizar la recuperación de mineral o minimizar la incorporación de estéril en la extracción.



Luego se define la secuencia de extracción. MSBPC sólo genera secuencias de frente plano, por consiguiente, se trabajó en el modelo de estudio bajo esta restricción.

El siguiente paso corresponde a generar los planes de producción. En este procedimiento se entregan las tasas de producción en función del parámetro de hundibilidad y de la altura de columna y no sobre el porcentaje de extracción de columnas. Esto genera diferencias en las tasas de producción para columnas con distintas alturas por lo que se trabajó bajo la restricción de tener alturas de columnas iguales con el fin de generar tasas de producción en función de porcentajes de extracción de columnas equivalentes.

Luego de validar los procedimientos realizados por MSBPC se debe generar un modelo en el cual se pueda trabajar bajo las restricciones de MSBPC. El modelo generado tiene las siguientes consideraciones.

- Modelo de Malla cuadrada de 15x15.
- 100 puntos de extracción, con bateas acorde a la geometría de la malla con un área total de 22.500 m<sup>2</sup>.
- Densidad uniforme de 2.7 ton/m<sup>3</sup>.
- La zona mineralizada corresponde a una región cuadrada acorde a los puntos de extracción.
- Todas las columnas tienen la misma distribución de leyes en altura con el fin de generar un techo de columna uniforme.
- Los parámetros asociados a la mecánica del flujo gravitacional para REBOP fueron extraídos de un proyecto de validación para una mina real.

## **7.2. Resultados de las simulaciones**

Se generó un conjunto de 7 pruebas las cuales 4 corresponden a diferentes secuencias de Panel Caving y otras 3 pruebas de Block Caving con 4 bloques cada una que también son extraídos en diferentes secuencias. Cada bloque tiene un área de 5.625 m<sup>2</sup>.

Para cada una de estas pruebas se efectuaron tres estudios, el primero para analizar el comportamiento de la mezcla vertical Para realizar estas simulaciones se utilizó la restricción de la hundibilidad en REBOP sólo para el sector proyectado verticalmente sobre las columnas de extracción, el segundo estudio está relacionado con la influencia de la dilución horizontal sobre los puntos de extracción y cómo afecta esta al modelo de reservas. Finalmente, la tercera etapa tiene por objetivo analizar los dos problemas de mezcla en conjunto y obtener relaciones de acuerdo al tipo de secuencia con el problema físico de la mezcla y reevaluar la envolvente económica en función de la generación de un nuevo modelo diluido para cada secuencia de extracción.

### *7.2.1. Estudio sobre la dilución vertical*

De los resultados de extracción obtenidos de REBOP se observó que no existen diferencias determinantes para las distintas simulaciones de Panel Caving, así como tampoco se notan

diferencias claras entre las pruebas de Block Caving. Sin embargo, a modo más general, existen diferencias importantes entre Panel y Block Caving.

Promediando las pruebas de Panel Caving (Pruebas P) y las de Block Caving (Pruebas Q) se observó las leyes en Panel Caving entregan un resultado de un 5.4% mayor con respecto al Block Caving. En el caso de la entrada de dilución, el valor de Panel Caving es un 19% menor que en el Block Caving. La baja de leyes en Block Caving y la entrada más temprana de la dilución se puede explicar por las extracciones de bloques en secuencias discretas a diferencia del panel caving que la secuencia comprende aberturas y cierres de puntos de extracción de forma continua.

Por otro lado, la diferencia con lo planificado según la pre-mezcla, independiente de la secuencia, tiene a sobrestimar las reservas con respecto a REBOP. MSBPC arroja resultados de mezcla vertical cerca del 2.7% mayores a Panel Caving mientras que para el caso del Block Caving, MSBPC arroja leyes 8.2% mayores. Estos resultados muestran una clara sobreestimación de leyes con respecto al flujo gravitacional.

### *7.2.2. Estudio sobre la dilución horizontal*

La incidencia de la dilución lateral está determinada principalmente por los puntos externos, de los cuales, los que tienen mayor dilución lateral son los puntos esquinas. Para los puntos laterales se observa que en el caso de Panel Caving, la contribución lateral es de 32% aproximadamente, y para Block Caving 37%, teniendo un 13% más dilución lateral que Panel Caving.

En el caso de los puntos esquinas, la influencia de la dilución lateral es sobre 46% siendo mayor en Block Caving, un 11% más con respecto a Panel Caving. Es directo notar que la influencia que tiene la dilución lateral sobre los puntos externos de una mina incide directamente en las reservas estimadas. Si se trata de un secuenciamiento tipo Panel Caving se debería esperar un castigo en ley diluida lateral del orden de un 30%. Esta diferencia puede ser menos considerable cuando se trabaja sobre una mina de mayores dimensiones, considerando que el estudio se basa en un área de 22.500 m<sup>2</sup>. También dependerá de la geometría de la mina, lo que se puede expresar con el radio hidráulico, mientras menor sea el valor del radio hidráulico, se tendrá porcentualmente, mayor dilución lateral.

### *7.2.3. Estudio final de simulaciones*

El tercer estudio comprende la generación de las simulaciones utilizando la mezcla horizontal y vertical en conjunto. Del estudio se observó que la diferencia entre Block y Panel Caving en cuanto a ley es de un 7%. La diferencia con planificar según el método de pre-mezcla es aún mayor ya que para los mismos parámetros técnico-económicos, la ley media extraída es de un 0.84% lo que según los resultados, es un 8.25% mayor que las leyes para un Panel Caving y un 15.8% mayor que Block Caving si se considera un modelo de flujo con la posibilidad de mezcla horizontal. Esto es una diferencia significativa dada la gran baja en las reservas, si se consideran las reservas como las determinadas según el modelo de pre-mezcla.

Con respecto a la dilución y los bajos valores para la entrada de esta, de acuerdo a los estudios anteriores se puede afirmar que esta, corresponde a la dilución lateral, principalmente reportada para los puntos externos de la mina.

#### *7.2.4. Revalorización del modelo*

Considerando los resultados anteriores, el último paso según la metodología corresponde a reevaluar el modelo de acuerdo a la secuencia de extracción. Del estudio se llegó a concluir que las diferencias relevantes en estimación de leyes vienen dadas principalmente por el tipo de método de secuenciamiento, por lo tanto, se reevaluó la envolvente económica basándose en el caso de Panel Caving y Block Caving como métodos generales, sin una secuencia específica tipo Panel ni de Block. Los resultados obtenidos en cuanto a VAN operacional muestran una mejora de 3.6% para la revalorización cuando se trata de una secuencia tipo Panel Caving y de un 12.5% cuando se considera una secuencia tipo Block Caving en comparación al VAN operacional obtenidos para las mismas secuencias pero considerando la envolvente económica inicial. Se considera la envolvente económica inicial la que es generada por MSBPC, es decir, la que se genera sólo por el método volumétrico de mezcla vertical (Laubscher, 1994).

De los resultados obtenidos, finalmente se puede concluir que una revalorización del modelo de reservas en función de la secuencia mediante la utilización de nuevas herramientas para modelar el flujo gravitacional, es de utilidad, dado que el modelo largamente utilizado para definir un modelo de reservas no comprende como parámetro de entrada, la secuencia de extracción. En el trabajo se ha mostrado que existen diferencias basadas principalmente en el método. Es por esta razón que se propone esta metodología que incorpora los avances que se han realizado en cuanto a la mecánica del caving y su modelación para determinar las reservas extraíbles ya que esta considera el fenómeno del flujo gravitacional para la generación del proceso de mezcla, lo que conlleva a obtener resultados más acertados.

El estudio muestra claramente que el uso de una herramienta que incorpora el flujo gravitacional tiene efectos relevantes en la estimación de reservas para block y panel caving. El estudio también clarifica que la dilución lateral influye considerablemente a la estimación de reservas por lo que se hace relevante la incorporación de un modelo de mezcla que incorpore la dilución horizontal. La revalorización muestra que aumenta el VAN y disminuye la cantidad de finos por lo que la metodología propuesta logra establecer diferencias con respecto a la forma actual de estimación de reservas y se puede diferenciar entre distintos métodos de secuenciamiento de extracción como lo son el Panel Caving y el Block Caving.

### **7.3. Recomendaciones**

Será de gran relevancia como trabajo futuro establecer esta metodología en minas reales para determinar las diferencias en la envolvente económica determinada antes y después de la revalorización en función de las distintas secuencias propuestas.

Adicionalmente en REBOP, se puede implementar la propagación del caving, lo cual será de utilidad cuando se cuente con un modelo de propagación, ya que esto permitiría obtener resultados más certeros.

Finalmente, es importante asegurar que los parámetros utilizados para la modelación del flujo sean los correctos, esto quiere decir que hay que contar con una comparación con los datos reales de cada mina mediante un back análisis.

## CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- Brown, E. (2003). *Block Caving Gemenics*.
- Castro, R. (2001). *Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional*.
- Castro, R. (2006). *Study of the Mechanism of Gravity flow for block caving*.
- Castro, R., Tamburrino, A., & Fernandez, F. (2010). Development of the kinematic model to rapidly simulate the flow of caved rock for block. *Caving 2010* , 583-591.
- Chitombo, G. (2010). Cave mining — 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining –state of the art'. *Caving 2010* , 45-61.
- De la Huerta, F. (1994). Aplicación del criterio de costo de oportunidad en la planificación de producción de minas subterráneas. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile* .
- Diering, T. (2008). Block cave scheduling with a piece of paper. *MassMin 2008* .
- Diering, T. (2000). PC-BC: A Block Cave Design and Draw Control System. *MassMin 2000* , 469-484.
- Diering, T., Richter, O., & Villa, D. (2008). Block Cave Production Scheduling Using PCBC. *MassMin 2008* .
- Itasca, I. (2008). *REBOP Version 3.1 For Block Caving User Guide*.
- Kvapil, R. (1965). Gravity Flow of Granular and Coarse Materials in Hoppers and Bins. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* , 2 (113), 277-304.
- Laubscher, D. (2000). *A Practical Manual of Block Caving*.
- Laubscher, D. (1994). Cave Mining, the state of the art. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* , 279 – 293.
- Mintec Inc. (2010). *Manual MineSight Block Panel Caving*.
- Pierce, M. (2009). *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*.
- Rubio, E. (1998). *Long Term Planning of Block Caving Operations Using Mathematical Programming Tools*. Vancouver.
- Rubio, E., & Diering, T. (2004). Block cave production planning using operation research tools. *MassMin 2004* , 141-149.
- Vargas, R. (2010). *Metodología de Diseño de Malla de Extracción en Block y Panel Caving incorporando Back-Análisis*.

## CAPÍTULO 9: ANEXO

### 9.1. Código Matlab para validación Matrices de Mezcla

```
%Laubscher_matriz
%Modelo de bloques diluido utilizando modelo volumetrico de Laubscher
% Import block model
% Block model dimensions
% Bloques contiene: n° bloque (en orden descendente), altura insitu, altura
re-escalada(ejey1), altura re-escalada(ejey2),leyCuT, densidad

a=20; %ancho del bloque
Pol_bloques=cell(length(Bloques(:,1))-1,1);
Pol_mb=cell(length(Bloques(:,1))-1,1);

% Calculates mixing curves from VM

% Calcula poligono de cada bloque diluido
for j=1:length(Bloques(:,1))-1
    Pol_bloques{j}(1,1)=0;
    Pol_bloques{j}(1,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j-1,3); %cada bloque se
construye de abajo hacia arriba

    Pol_bloques{j}(2,1)=a ;
    Pol_bloques{j}(2,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j-1,4);

    Pol_bloques{j}(3,1)=a ;
    Pol_bloques{j}(3,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j,4);

    Pol_bloques{j}(4,1)=0;
    Pol_bloques{j}(4,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j,3);

    Pol_bloques{j}(5,1)=0;
    Pol_bloques{j}(5,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j-1,3);

    plot(Pol_bloques{j}(:,1),Pol_bloques{j}(:,2));
    hold on;
end

% Modelo in-situ
for j=1:length(Bloques(:,1))-1
    Pol_mb{j}(1,1)=0;
    Pol_mb{j}(1,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j-1,2);

    Pol_mb{j}(2,1)=a ;
    Pol_mb{j}(2,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j-1,2);

    Pol_mb{j}(3,1)=a ;
    Pol_mb{j}(3,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j,2);

    Pol_mb{j}(4,1)=0;
    Pol_mb{j}(4,2)=Bloques(find(Bloques(:,1))==j,2);
```

```

Pol_mb{j}(5,1)=0;
Pol_mb{j}(5,2)=Bloques(find(Bloques(:,1)==j-1),2);

plot(Pol_mb{j}(:,1),Pol_mb{j}(:,2),'-r');
hold on;
end

% intercept pol.bloques with block model polygons

for j=1:length(Bloques(:,1))-1 %para cada polygon en el modelo de bloques
% para cada poligono en el modelo de mezcla busca la intercepcio, para
% definir mezcla
for i=1:length(Bloques(:,1))-1
[lati,loni] =
polybool('intersection',Pol_bloques{i}(:,1),Pol_bloques{i}(:,2),Pol_mb{j}(:,1)
,Pol_mb{j}(:,2));

Matrizmezcla(j,i)=polyarea(lati,loni)/polyarea(Pol_mb{j}(:,1),Pol_mb{j}(:,2))
;
end
end

% Modelo diluido
% Curva mezcla calcula el modelo diluido en altura, a partir de la Matriz
% de mezcla
% La columna 6 guarda la ley y la 5 la densidad diluida

Bloques=Bloques(1:length(Bloques(:,1))-1,:);
Bloques(:,7)=Bloques(:,5).*Bloques(:,6);
Bloques(:,8)=Matrizmezcla*Bloques(:,7); %fino= %bloque x densidad x
ley
Bloques(:,9)=Matrizmezcla*Bloques(:,6) %densidad del modelo
diluido=%bloque x densidad, esta en columna 9
Bloques(:,10)=Bloques(:,8)./Bloques(:,9); %ley diluida=fino/densidad diluida,
esta en columna 10
Bloques(:,11)=Bloques(:,9).*Bloques(:,2).*234.303741;

```

## 9.2. Código Matlab para Matrices de Mezcla Vertical en función de marcadores de REBOP

```

% Asociar marcadores con tonelaje extraido
% en archivo marcadores guarda nombre,x,y,z,masa in-situ,periodo(dia)
% extraccion guarda periodo, dias, volumen periodo, volumen acum

% en archivos puntos_xy guarda la posicion x e y de cada punto
voronoi(puntos_xy(:,1),puntos_xy(:,2)); % plot diagram
[V c]=voronoin([puntos_xy(:,1),puntos_xy(:,2)]); %puntos de la malla
for i=1:length(c)
vertices{i}=V(c{i},:);
end
for i=1:length(vertices)
k=length(vertices{i});
vertices{i}(k+1,:)=vertices{i}(1,:);
end

```

```

for j=1:length(puntos_xy)           %points
    for i=1:length(vertices)       %voronoi diagrams
        if sum(vertices{i}(:,1))<999999999999999
            IN =
inpolygon(puntos_xy(j,1),puntos_xy(j,2),vertices{i}(:,1),vertices{i}(:,2));
            if IN==1
                puntos_xy(j,3)=polyarea(vertices{i}(:,1),vertices{i}(:,2));
                puntos_xy(j,4)=i;           %posicion dentro de
archivo de vertices para determinar si esta al interior de area
            end
        end
    end
end
end
volumen_mezcla=3375:3375:length(modelo_diluido)*3375;
% columna de tonelaje acumulado
matriz_mezcla=cell(size(puntos_xy,1),1);
%calcula distancias de viaje en planta
l=1;
for m=1:size(puntos_xy,1)
    if puntos_xy(m,3)< 410 && puntos_xy(m,3)>0
        %inicializar matriz de mezcla del punto m

matriz_mezcla{m}(1:length(volumen_mezcla),1:length(modelo_diluido)+1)=0;
matriz_mezcla{m}(:,1)=volumen_mezcla;
%encuentra marcadores extraidos en el punto m
u2=find(marcadores(:,1)==m);
mar2=marcadores(u2,:);
for h=1:size(mar2,1)
    for k=1:size(matriz_mezcla{m},1)
        if mar2(h,7)< matriz_mezcla{m}(k,1);
            break; %k guarda la fila si se extrae en el intervalo
        end
    end
    % si esta en el poligono preguntar a que tajada en altura pertenece
    for j=1:length(modelo_diluido)
        if mar2(h,5)< modelo_diluido(j,19);           %altura menor
a altura in-situ
            break
            %j guarda
la tajada a la cual pertenece
        end
    end
    matriz_mezcla{m}(k,j)=matriz_mezcla{m}(k,j)+125; %densidad in-
situ;
    mar2(h,9)=k;
    mar2(h,10)=j+1;
    marcadores2(l,:)=mar2(h,:);
    l=l+1;
    %hold on; plot3(mar2(h,4),mar2(h,4),mar2(h,5),'r');
end
end
end
end
%suma matrices en cluster
matriz_total(1:length(volumen_mezcla),1:length(modelo_diluido)+1)=0;
for m=1:size(puntos_xy,1)
    if length(matriz_mezcla{m})>0
        matriz_total=matriz_total+matriz_mezcla{m};
    end
end
end

```



### 9.3. Resultados Simulaciones Mezcla Vertical

3.2%	32.6%	41.2%	23.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.8%	19.9%	43.5%	35.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	4.8%	11.5%	13.9%	36.7%	29.5%	3.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	4.7%	4.0%	8.5%	14.9%	33.5%	27.4%	6.6%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	2.9%	4.2%	5.4%	8.7%	19.1%	29.0%	23.1%	5.0%	1.9%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	3.6%	1.9%	3.5%	9.8%	20.9%	29.2%	20.1%	5.3%	3.5%	1.7%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.7%	1.3%	1.4%	3.9%	10.3%	19.2%	29.3%	19.3%	5.7%	5.2%	2.4%	1.1%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.5%	0.5%	0.8%	1.7%	4.0%	11.3%	19.5%	26.2%	17.0%	7.0%	5.8%	3.7%	1.6%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	2.2%	0.5%	0.2%	0.7%	1.4%	4.4%	10.8%	19.4%	22.2%	17.2%	8.7%	6.1%	4.5%	1.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.5%	1.0%	0.0%	0.1%	1.0%	1.9%	5.7%	10.8%	18.0%	21.0%	16.1%	9.0%	7.5%	5.2%	1.7%	0.3%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	0.1%	0.5%	1.5%	3.1%	6.6%	12.0%	16.7%	19.9%	15.4%	9.3%	8.7%	4.4%	1.2%	0.1%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.3%	1.0%	2.2%	4.3%	6.7%	11.0%	15.2%	19.5%	16.2%	9.9%	9.1%	3.4%	0.8%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.7%	1.4%	2.6%	4.5%	7.0%	10.7%	15.6%	17.7%	15.7%	11.8%	8.9%	2.6%	0.4%
0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	1.1%	2.0%	4.2%	5.5%	7.8%	10.7%	14.6%	17.8%	13.4%	13.5%	6.9%	1.4%
0.0%	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.6%	1.4%	3.3%	4.5%	5.7%	7.0%	11.1%	15.9%	17.8%	15.0%	12.9%	3.0%
0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.3%	1.1%	2.5%	3.4%	4.9%	5.1%	7.5%	11.4%	16.1%	18.9%	16.1%	9.6%
0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.9%	2.2%	2.9%	4.1%	4.8%	6.1%	9.0%	13.7%	18.3%	16.7%	15.9%

Figura 9.1. Matriz Mezcla P4.

3.2%	32.7%	40.8%	23.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.7%	21.0%	45.7%	31.8%	0.4%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	5.1%	11.0%	12.4%	41.7%	27.9%	1.4%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	4.3%	4.0%	9.9%	16.5%	39.6%	23.9%	1.4%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	3.0%	4.4%	4.6%	7.1%	18.8%	36.2%	23.3%	2.1%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	3.3%	1.8%	3.2%	9.9%	22.5%	35.2%	20.8%	2.4%	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.7%	0.8%	1.7%	3.3%	10.1%	23.0%	34.8%	19.9%	3.7%	1.4%	0.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	1.4%	0.5%	0.6%	1.3%	4.1%	9.7%	22.9%	35.3%	16.4%	3.9%	2.3%	0.9%	0.6%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	1.5%	0.9%	0.2%	0.5%	1.3%	3.5%	10.2%	22.9%	32.0%	17.1%	5.2%	2.7%	1.1%	0.7%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.5%	0.7%	0.1%	0.1%	0.3%	1.0%	3.5%	10.6%	22.8%	29.9%	16.8%	7.2%	3.5%	1.8%	0.9%	0.2%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	1.5%	4.2%	11.2%	21.4%	26.6%	18.8%	7.6%	4.6%	2.2%	0.9%	0.1%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	2.0%	4.5%	10.4%	20.8%	25.4%	19.5%	8.0%	5.6%	2.6%	0.4%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.5%	2.3%	5.5%	10.8%	19.9%	25.3%	18.4%	8.8%	6.0%	1.9%	0.2%
0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	1.3%	3.4%	6.6%	10.2%	19.1%	25.1%	17.8%	9.4%	5.2%	1.1%
0.0%	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.7%	2.1%	4.4%	6.4%	10.6%	19.2%	26.4%	16.0%	10.1%	2.9%
0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.9%	2.0%	4.9%	7.1%	11.2%	19.0%	27.7%	17.7%	7.5%
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.5%	1.0%	2.6%	5.3%	8.2%	13.8%	24.3%	29.5%	12.4%

Figura 9.2. Matriz Mezcla P5

3.2%	32.7%	41.7%	22.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.8%	20.6%	48.1%	30.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	5.7%	11.0%	12.8%	41.9%	26.7%	1.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	3.8%	4.0%	12.8%	18.7%	40.3%	18.9%	0.9%	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	2.7%	4.7%	4.3%	9.7%	22.1%	38.1%	16.1%	1.2%	0.4%	0.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.4%	2.8%	1.5%	2.8%	9.0%	25.8%	38.3%	16.0%	2.2%	0.6%	0.3%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	1.0%	0.7%	0.7%	3.1%	11.1%	27.7%	36.1%	14.2%	3.5%	1.2%	0.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	1.4%	0.4%	0.3%	0.8%	3.4%	11.0%	26.0%	36.6%	12.5%	4.3%	2.2%	0.8%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	1.6%	0.7%	0.4%	0.7%	0.9%	4.1%	12.4%	25.2%	33.0%	11.9%	4.1%	3.0%	1.8%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.5%	1.0%	0.5%	0.8%	0.8%	1.4%	4.5%	11.2%	25.5%	31.2%	12.8%	4.9%	2.9%	1.8%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%	0.3%	0.7%	0.9%	2.3%	5.3%	10.8%	23.3%	30.5%	13.0%	6.2%	5.0%	1.2%	0.2%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.6%	1.5%	2.9%	5.2%	10.9%	22.3%	28.9%	14.3%	6.8%	5.1%	1.0%	0.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.3%	1.0%	1.6%	3.6%	6.1%	10.5%	20.0%	26.2%	15.4%	9.5%	4.4%	1.0%	0.0%
0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	1.1%	2.4%	3.5%	6.5%	10.4%	19.2%	23.0%	17.8%	10.5%	4.2%	0.4%
0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.7%	1.3%	2.8%	3.7%	7.1%	10.8%	18.4%	22.5%	17.5%	11.0%	2.7%
0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	0.5%	0.8%	1.5%	2.8%	4.7%	7.6%	11.2%	18.4%	21.2%	18.1%	9.8%
0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.4%	1.2%	2.3%	4.2%	6.1%	8.0%	13.1%	21.4%	21.6%	15.1%	4.4%

Figura 9.3. Matriz Mezcla P6



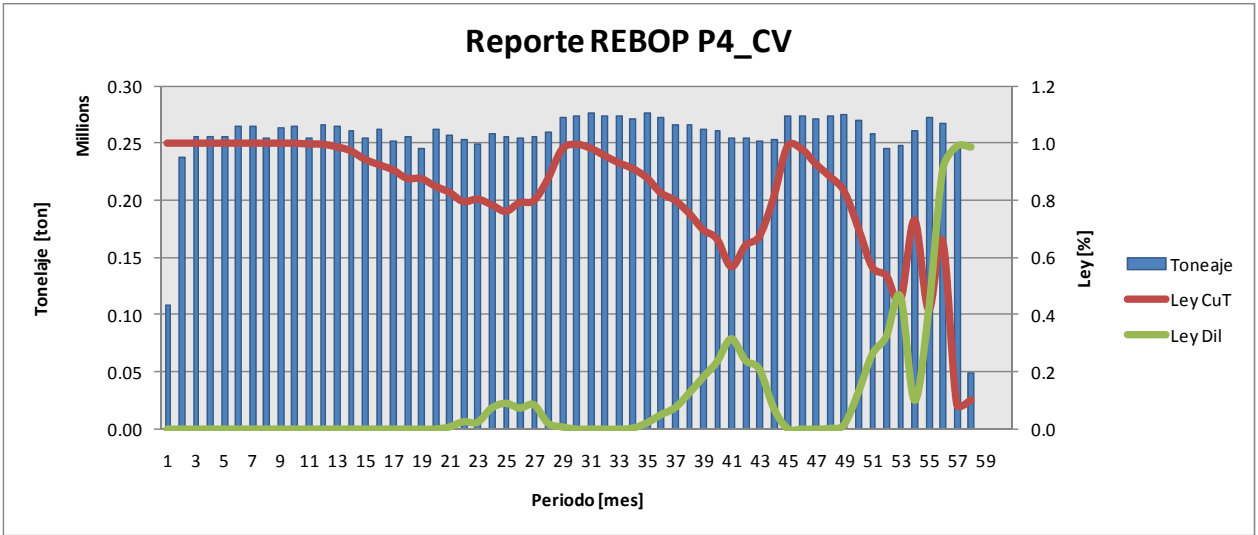


Figura 9.8. Extracción P4

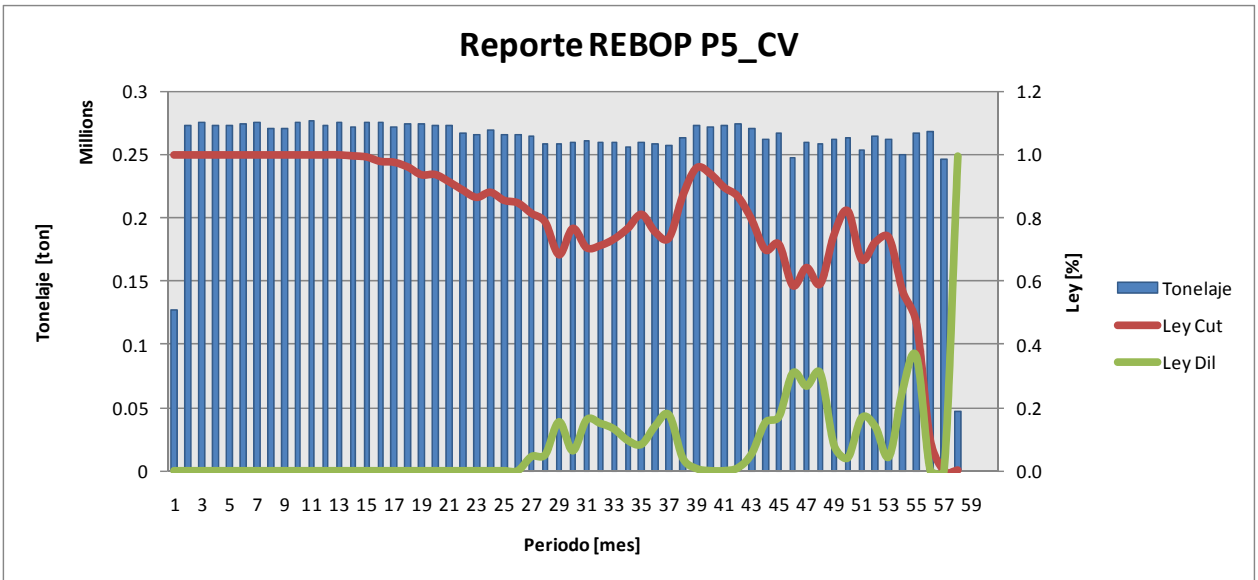


Figura 9.9. Extracción P5

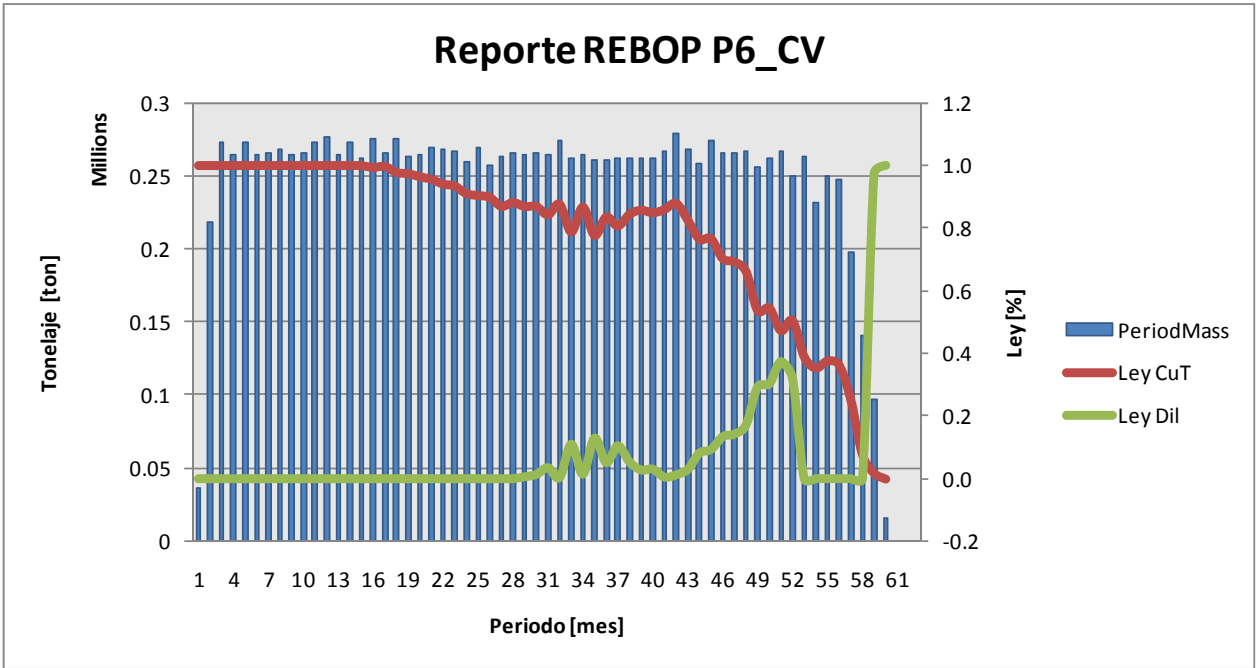


Figura 9.10. Extracción P6

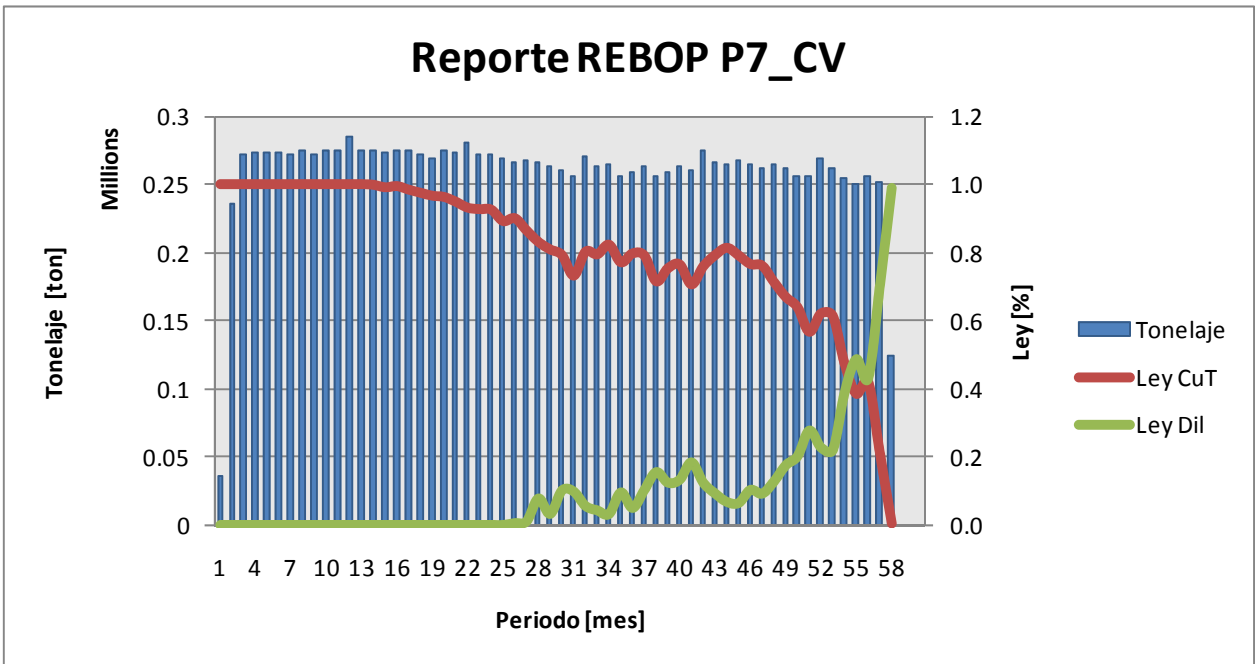


Figura 9.11. Extracción P7

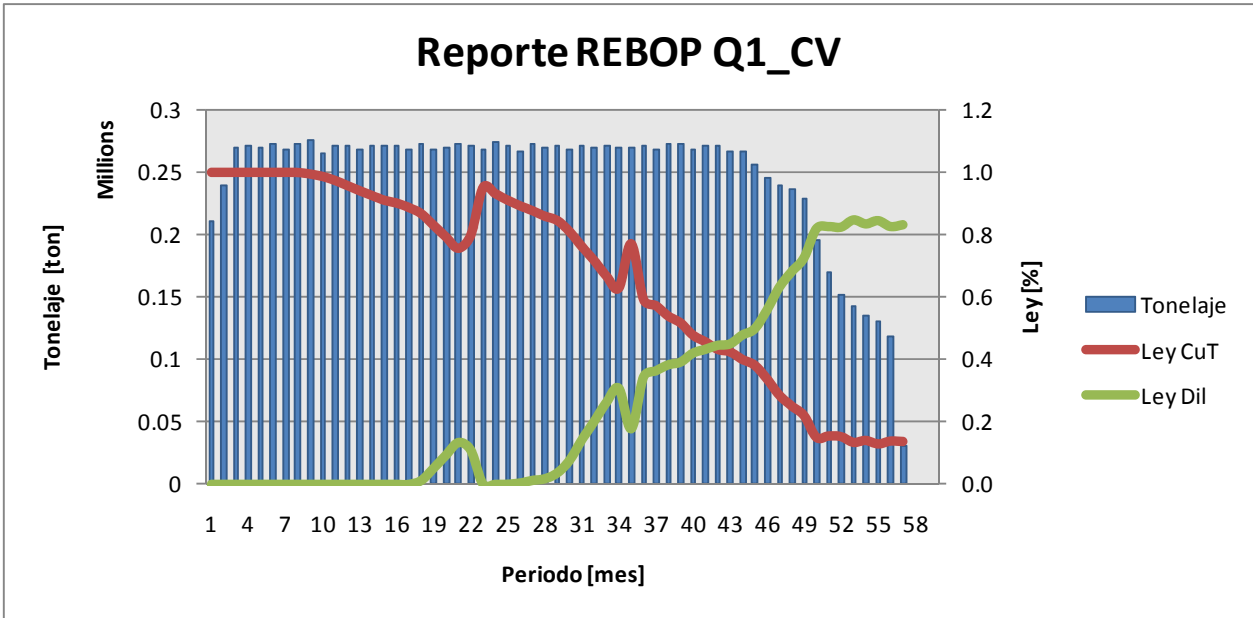


Figura 9.12. Extracción Q1

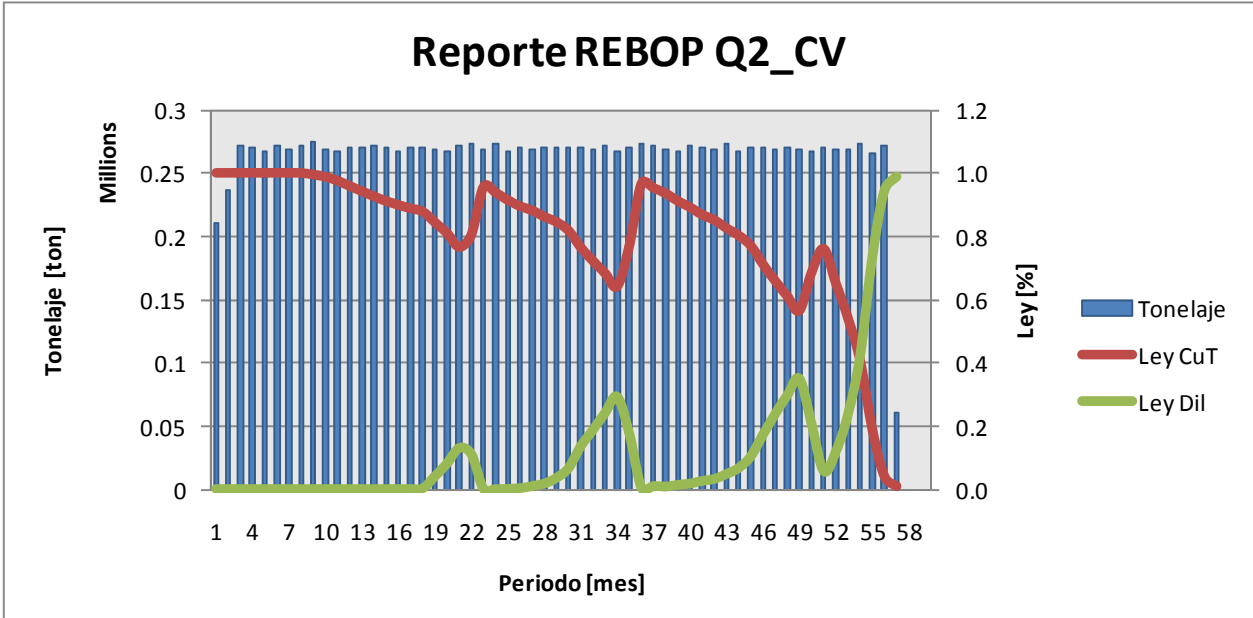


Figura 9.13. Extracción Q2

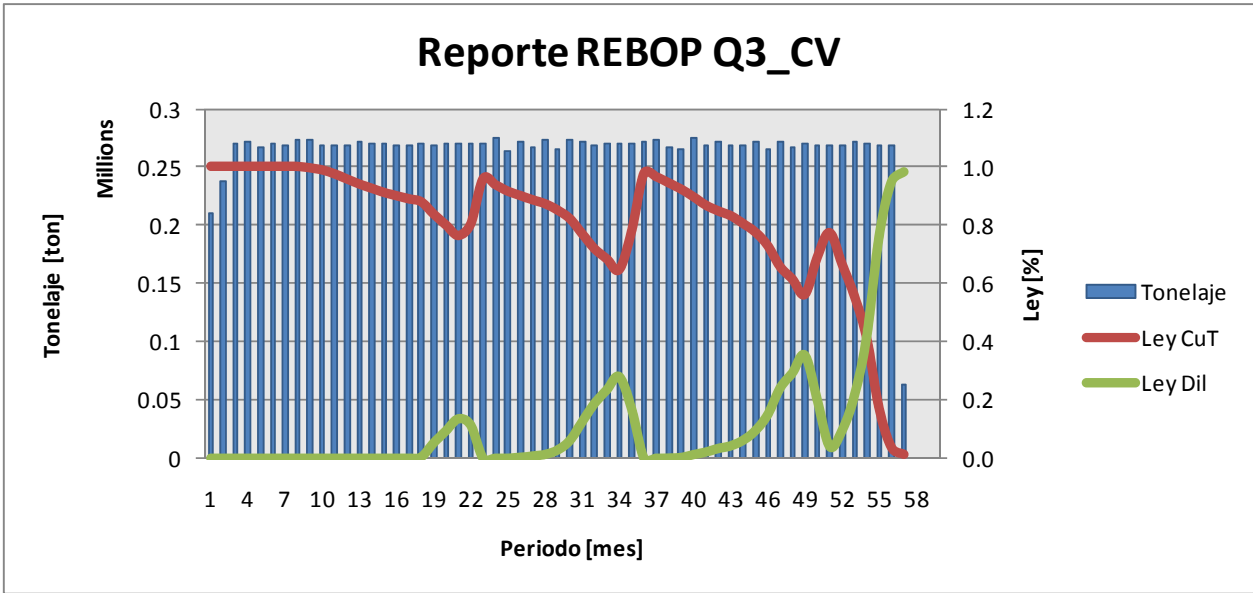


Figura 9.14. Extracción Q3

#### 9.4. Resultados simulaciones mezcla horizontal

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% Total
1	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%
2	7.1%	0.0%	0.0%	0.0%	7.1%
3	8.9%	0.0%	0.0%	0.0%	8.9%
4	8.9%	0.1%	0.0%	0.0%	9.0%
5	5.5%	3.1%	0.0%	0.0%	8.6%
6	4.2%	5.3%	0.0%	0.0%	9.5%
7	5.5%	3.9%	0.0%	0.0%	9.4%
8	5.7%	3.9%	0.0%	0.0%	9.5%
9	4.9%	5.1%	0.0%	0.0%	10.0%
10	6.1%	4.3%	0.2%	0.0%	10.6%
11	5.7%	4.5%	1.8%	0.0%	12.0%
12	4.9%	3.0%	2.0%	0.0%	9.9%
13	6.1%	5.8%	2.7%	0.0%	14.7%
14	5.5%	5.2%	4.1%	0.0%	14.8%
15	8.0%	4.9%	3.5%	0.0%	16.4%
16	5.9%	5.7%	3.7%	0.0%	15.3%
17	8.2%	5.1%	3.1%	0.0%	16.4%
18	7.1%	5.8%	4.8%	0.0%	17.7%
19	5.9%	5.4%	4.1%	0.2%	15.5%
20	6.2%	7.2%	2.4%	0.5%	16.3%
21	5.9%	6.2%	3.3%	2.4%	17.8%
22	5.2%	5.9%	3.6%	1.4%	16.1%
23	3.1%	3.6%	1.9%	0.0%	8.6%
24	3.6%	4.2%	1.0%	0.0%	8.8%
25	2.7%	2.6%	1.1%	0.0%	6.4%
26	3.1%	3.6%	1.7%	0.0%	8.4%
27	1.2%	1.9%	0.3%	0.0%	3.5%
28	1.5%	1.8%	0.9%	0.0%	4.2%
29	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
30	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%	2.7%
31	4.6%	0.2%	0.0%	0.0%	4.8%
32	6.2%	2.2%	0.0%	0.0%	8.4%
33	5.4%	2.0%	0.0%	0.0%	7.4%
34	4.6%	2.3%	0.0%	0.0%	6.9%
35	5.4%	3.8%	0.1%	0.0%	9.2%
36	4.5%	4.7%	0.1%	0.0%	9.3%
37	3.4%	3.8%	0.2%	0.0%	7.4%
38	5.8%	6.5%	1.5%	0.0%	13.8%
39	5.4%	4.1%	1.4%	0.0%	10.9%
40	5.9%	3.5%	2.5%	0.0%	11.9%
41	2.7%	3.2%	0.4%	0.0%	6.4%
42	2.8%	3.6%	2.7%	0.0%	9.1%
43	2.3%	2.8%	0.1%	0.0%	5.1%
44	5.8%	1.4%	0.6%	0.0%	7.8%
45	8.4%	0.0%	0.0%	0.0%	8.4%
46	5.6%	0.2%	0.0%	0.0%	5.7%
47	7.1%	2.4%	0.0%	0.0%	9.5%
48	9.1%	2.1%	0.0%	0.0%	11.2%
49	7.6%	5.8%	0.0%	0.0%	13.4%
50	3.7%	7.0%	0.1%	0.0%	10.7%
51	4.7%	6.1%	1.3%	0.0%	12.2%
52	3.7%	3.7%	2.8%	0.0%	10.2%
53	6.5%	4.1%	3.4%	0.0%	14.0%
54	27.0%	14.0%	1.3%	0.0%	42.3%
55	29.1%	34.1%	0.0%	0.0%	63.2%
56	13.3%	28.1%	16.9%	0.0%	58.2%
57	13.5%	16.2%	26.5%	0.0%	56.1%
58	12.7%	8.6%	31.7%	2.3%	55.3%

Figura 9.15. Contribución horizontal por sector P4

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% ID5
1	0.1%	3.7%	0.0%	0.0%	0.0%
2	0.0%	3.2%	0.0%	0.0%	0.0%
3	0.0%	4.7%	0.0%	0.0%	0.0%
4	0.0%	3.7%	0.0%	0.0%	0.0%
5	0.0%	10.7%	0.0%	0.0%	0.0%
6	0.0%	6.5%	1.5%	0.0%	0.0%
7	0.0%	4.5%	4.0%	0.0%	0.0%
8	0.0%	6.5%	5.0%	0.0%	0.0%
9	0.0%	5.6%	4.3%	0.0%	0.0%
10	0.0%	7.9%	3.7%	0.0%	0.0%
11	0.0%	6.9%	4.0%	0.0%	0.0%
12	0.0%	6.8%	3.8%	0.1%	0.0%
13	0.0%	7.6%	5.0%	0.2%	0.0%
14	0.0%	4.3%	3.4%	1.6%	0.0%
15	0.0%	7.8%	5.9%	2.7%	0.0%
16	0.0%	4.9%	5.1%	2.1%	0.0%
17	0.0%	7.1%	5.3%	2.1%	0.0%
18	0.0%	4.5%	5.5%	2.7%	0.0%
19	0.0%	6.9%	3.8%	4.0%	0.0%
20	0.0%	5.1%	7.1%	2.5%	0.0%
21	0.0%	7.1%	5.9%	2.9%	0.0%
22	0.0%	6.6%	6.7%	3.0%	0.0%
23	0.0%	7.1%	5.7%	3.1%	0.0%
24	0.0%	7.3%	6.4%	3.6%	0.1%
25	0.0%	5.7%	7.4%	3.4%	0.2%
26	0.0%	4.9%	7.5%	3.6%	0.5%
27	0.0%	4.8%	7.2%	3.7%	1.3%
28	0.0%	6.0%	6.9%	4.8%	1.2%
29	0.0%	5.2%	4.3%	2.9%	1.6%
30	0.0%	5.0%	4.9%	5.5%	0.0%
31	0.0%	2.5%	2.2%	0.2%	0.0%
32	0.0%	3.5%	3.9%	3.4%	0.0%
33	0.0%	1.9%	4.2%	1.5%	0.0%
34	0.0%	4.3%	1.8%	1.9%	0.0%
35	0.0%	2.7%	1.5%	3.2%	0.0%
36	0.0%	3.4%	1.7%	0.5%	0.0%
37	0.0%	5.8%	1.9%	1.4%	0.0%
38	0.0%	2.6%	0.0%	0.0%	0.0%
39	0.0%	5.9%	2.6%	0.0%	0.0%
40	0.0%	8.3%	3.7%	0.1%	0.0%
41	0.0%	6.5%	3.7%	0.0%	0.0%
42	0.0%	4.1%	6.4%	0.0%	0.0%
43	0.0%	6.8%	4.9%	1.3%	0.0%
44	0.0%	8.0%	2.2%	0.9%	0.0%
45	0.0%	5.2%	4.0%	3.9%	0.0%
46	0.0%	3.5%	2.5%	0.7%	0.0%
47	0.0%	8.8%	3.6%	3.6%	0.0%
48	0.0%	9.2%	5.9%	0.6%	0.0%
49	0.0%	8.8%	4.4%	0.1%	0.0%
50	0.0%	4.9%	5.4%	2.0%	0.0%
51	0.0%	8.6%	11.2%	1.4%	0.0%
52	0.0%	10.7%	10.6%	0.0%	0.0%
53	0.0%	6.0%	6.5%	1.1%	0.0%
54	0.0%	31.9%	21.8%	0.1%	0.0%
55	0.0%	18.9%	29.8%	14.9%	0.0%
56	0.0%	13.4%	19.9%	20.8%	0.0%
57	0.0%	1.6%	2.2%	6.3%	0.3%
58	0.3%	2146.6%	1708.3%	708.6%	28.8%

Figura 9.16. Contribución horizontal por sector P5



Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% Total
1	3.1%	0.0%	0.0%	0.0%	3.1%
2	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
3	2.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%
4	3.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
5	5.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%
6	6.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%
7	3.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%
8	10.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%
9	5.9%	1.3%	0.0%	0.0%	0.9%
10	8.2%	2.0%	0.0%	0.0%	1.1%
11	4.4%	3.5%	0.0%	0.0%	0.8%
12	6.2%	3.8%	0.0%	0.0%	0.9%
13	8.4%	4.8%	0.0%	0.0%	1.1%
14	5.9%	3.0%	0.0%	0.0%	0.7%
15	7.1%	3.8%	0.0%	0.0%	0.8%
16	3.9%	3.6%	0.2%	0.0%	0.5%
17	6.7%	5.5%	0.6%	0.0%	0.8%
18	6.9%	5.2%	0.3%	0.0%	0.7%
19	6.2%	5.5%	0.5%	0.0%	0.7%
20	8.1%	4.1%	1.4%	0.0%	0.7%
21	5.3%	5.7%	1.4%	0.0%	0.6%
22	4.1%	3.1%	3.4%	0.0%	0.5%
23	5.2%	4.9%	3.3%	0.0%	0.6%
24	6.3%	5.6%	2.9%	0.0%	0.6%
25	3.5%	3.2%	4.1%	0.0%	0.4%
26	6.4%	4.5%	2.4%	0.0%	0.5%
27	4.4%	5.0%	2.3%	0.0%	0.4%
28	2.6%	3.0%	2.0%	0.0%	0.3%
29	4.6%	5.1%	2.4%	0.1%	0.4%
30	3.8%	2.8%	1.1%	0.0%	0.3%
31	4.5%	5.6%	3.1%	0.4%	0.4%
32	3.4%	4.8%	1.0%	0.0%	0.3%
33	3.2%	2.1%	2.3%	0.0%	0.2%
34	3.8%	4.6%	1.3%	0.1%	0.3%
35	3.6%	4.0%	1.2%	0.0%	0.3%
36	4.9%	4.8%	1.6%	0.0%	0.3%
37	2.4%	2.0%	0.4%	0.0%	0.1%
38	3.5%	4.0%	2.1%	0.1%	0.3%
39	4.2%	5.2%	1.0%	0.0%	0.3%
40	6.9%	3.6%	2.2%	0.0%	0.3%
41	14.2%	5.3%	2.1%	0.0%	0.5%
42	14.2%	5.1%	2.5%	0.0%	0.6%
43	8.4%	2.2%	0.7%	0.0%	0.3%
44	12.2%	5.3%	2.4%	0.0%	0.4%
45	10.8%	6.0%	1.2%	0.0%	0.4%
46	9.3%	8.0%	2.5%	0.0%	0.4%
47	8.2%	12.2%	5.2%	0.0%	0.6%
48	11.1%	13.8%	4.5%	0.0%	0.6%
49	5.9%	12.7%	2.0%	0.0%	0.4%
50	10.8%	11.9%	4.9%	0.0%	0.6%
51	9.2%	9.9%	7.5%	0.0%	0.5%
52	6.8%	8.8%	11.2%	0.0%	0.5%
53	9.4%	9.6%	7.5%	0.0%	0.5%
54	11.3%	11.3%	9.1%	0.4%	0.5%
55	7.7%	10.5%	5.6%	1.4%	0.4%
56	9.2%	13.9%	7.4%	0.6%	0.5%
57	6.5%	7.9%	10.2%	2.3%	0.4%
58	2.3%	1.6%	2.3%	1.4%	0.1%

Figura 9.17. Contribución horizontal por sector P6

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% Total
1	2.3%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%
2	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%
3	2.6%	0.0%	0.0%	0.0%	2.6%
4	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%
5	4.8%	0.0%	0.0%	0.0%	4.8%
6	6.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.0%
7	5.6%	0.7%	0.0%	0.0%	6.3%
8	5.7%	1.7%	0.0%	0.0%	7.4%
9	9.2%	2.3%	0.0%	0.0%	11.5%
10	7.0%	2.3%	0.0%	0.0%	9.3%
11	4.8%	1.8%	0.0%	0.0%	6.5%
12	6.9%	2.8%	0.0%	0.0%	9.7%
13	6.9%	4.3%	0.0%	0.0%	11.1%
14	10.3%	5.0%	0.5%	0.0%	15.8%
15	4.2%	3.6%	0.3%	0.0%	8.1%
16	8.4%	5.4%	0.5%	0.0%	14.3%
17	6.1%	4.3%	0.8%	0.0%	11.1%
18	6.1%	5.1%	0.8%	0.0%	12.0%
19	8.6%	4.5%	0.7%	0.0%	13.7%
20	6.4%	4.0%	1.9%	0.0%	12.3%
21	6.0%	7.1%	1.2%	0.0%	14.3%
22	8.8%	6.4%	1.9%	0.0%	17.1%
23	5.2%	4.3%	1.6%	0.0%	11.1%
24	8.1%	5.2%	3.2%	0.0%	16.5%
25	7.5%	4.7%	3.8%	0.0%	16.0%
26	7.6%	5.5%	3.5%	0.0%	16.7%
27	6.5%	3.8%	3.3%	0.0%	13.6%
28	7.8%	4.4%	5.2%	0.0%	17.3%
29	8.4%	4.6%	4.6%	0.2%	17.8%
30	6.4%	3.9%	5.2%	0.4%	16.0%
31	8.0%	7.6%	3.0%	0.4%	19.1%
32	3.2%	4.0%	3.0%	0.0%	10.3%
33	7.8%	9.2%	2.0%	0.1%	19.1%
34	4.2%	3.6%	3.6%	0.2%	11.6%
35	4.4%	7.1%	0.4%	0.0%	11.9%
36	3.3%	6.3%	2.5%	0.0%	12.0%
37	3.6%	6.4%	1.4%	0.0%	11.4%
38	6.2%	6.8%	1.3%	0.2%	14.4%
39	4.5%	5.2%	1.1%	0.0%	10.8%
40	6.1%	5.4%	1.1%	0.0%	12.6%
41	6.1%	5.8%	1.7%	0.0%	13.6%
42	4.9%	6.2%	2.5%	0.0%	13.6%
43	6.3%	4.8%	2.2%	0.0%	13.3%
44	3.9%	4.5%	1.9%	0.0%	10.4%
45	6.7%	6.1%	1.1%	0.0%	13.9%
46	6.4%	3.6%	1.0%	0.0%	10.9%
47	5.2%	3.2%	1.9%	0.0%	10.3%
48	6.1%	5.2%	2.2%	0.0%	13.4%
49	9.0%	4.2%	4.3%	0.0%	17.5%
50	5.6%	4.3%	2.4%	0.0%	12.3%
51	9.7%	9.2%	2.8%	0.0%	21.7%
52	9.4%	13.3%	3.6%	0.0%	26.4%
53	9.6%	11.4%	7.1%	0.0%	28.1%
54	8.3%	7.6%	6.7%	0.0%	22.6%
55	10.1%	12.1%	8.2%	0.1%	30.5%
56	14.9%	15.6%	8.5%	1.2%	40.2%
57	11.0%	13.9%	8.9%	0.2%	34.0%

Figura 9.18. Contribución horizontal por periodo P7

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% ID5
1	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	8.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	8.9%	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%
5	9.4%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%
6	8.4%	5.8%	0.0%	0.0%	0.0%
7	4.1%	3.9%	0.1%	0.0%	0.0%
8	3.8%	3.8%	0.7%	0.0%	0.0%
9	4.0%	4.5%	0.8%	0.0%	0.0%
10	6.1%	4.8%	1.3%	0.0%	0.0%
11	5.6%	4.8%	1.1%	0.0%	0.0%
12	6.5%	4.4%	1.4%	0.0%	0.0%
13	7.8%	4.2%	0.9%	0.0%	0.0%
14	7.6%	4.1%	1.5%	0.0%	0.0%
15	7.2%	5.8%	3.0%	0.0%	0.0%
16	6.8%	5.8%	3.9%	0.0%	0.0%
17	6.8%	5.8%	5.2%	0.0%	0.0%
18	7.7%	6.4%	3.7%	0.5%	0.0%
19	7.2%	5.2%	4.4%	0.6%	0.0%
20	7.4%	4.6%	5.4%	0.5%	0.0%
21	7.4%	5.2%	4.1%	0.4%	0.0%
22	4.5%	3.2%	0.3%	0.0%	0.0%
23	3.9%	4.5%	0.7%	0.0%	0.0%
24	4.4%	3.9%	1.2%	0.0%	0.0%
25	6.9%	4.4%	1.2%	0.0%	0.0%
26	6.7%	5.2%	1.4%	0.0%	0.0%
27	6.1%	5.2%	1.9%	0.0%	0.0%
28	7.8%	5.4%	1.6%	0.0%	0.0%
29	6.9%	4.9%	2.0%	0.1%	0.0%
30	8.0%	5.0%	2.2%	0.0%	0.0%
31	7.2%	5.5%	1.7%	0.0%	0.0%
32	7.3%	6.2%	3.9%	0.1%	0.0%
33	8.1%	5.9%	4.0%	0.4%	0.0%
34	8.7%	5.4%	2.7%	0.3%	0.0%
35	7.3%	6.8%	4.5%	0.7%	0.0%
36	7.1%	7.5%	4.6%	1.0%	0.0%
37	6.7%	9.9%	4.0%	1.0%	0.0%
38	6.2%	7.4%	6.2%	1.2%	0.0%
39	7.3%	8.0%	5.1%	0.9%	0.0%
40	6.1%	8.6%	5.7%	2.4%	0.0%
41	6.2%	7.9%	6.0%	1.5%	0.0%
42	6.3%	8.3%	5.8%	1.7%	0.0%
43	6.5%	8.3%	6.0%	2.4%	0.0%
44	6.9%	6.2%	5.5%	3.4%	0.0%
45	7.8%	6.9%	7.0%	3.7%	0.1%
46	5.4%	7.3%	7.6%	5.1%	0.0%
47	5.4%	6.0%	9.8%	4.6%	0.3%
48	4.3%	6.8%	9.2%	4.9%	0.3%
49	4.8%	7.5%	7.0%	7.3%	0.4%
50	6.4%	6.6%	7.3%	8.9%	1.1%
51	6.1%	5.0%	7.9%	9.1%	1.2%
52	5.7%	5.7%	6.8%	8.1%	2.8%
53	6.3%	6.1%	4.8%	8.5%	5.7%
54	5.6%	5.7%	6.1%	5.9%	7.2%
55	6.8%	7.1%	5.5%	6.1%	8.9%
56	1.8%	1.5%	1.6%	1.5%	2.0%

Figura 9.19. Contribución horizontal por periodo Q1

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% Total
1	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%
2	5.2%	0.0%	0.0%	0.0%	5.2%
3	9.4%	0.0%	0.0%	0.0%	9.4%
4	7.9%	2.7%	0.0%	0.0%	10.6%
5	9.3%	3.7%	0.0%	0.0%	12.9%
6	9.2%	4.9%	0.0%	0.0%	14.1%
7	4.3%	3.5%	0.1%	0.0%	7.8%
8	3.6%	4.5%	0.4%	0.0%	8.5%
9	2.6%	5.1%	1.1%	0.0%	8.8%
10	6.0%	5.2%	0.9%	0.0%	12.1%
11	5.8%	4.3%	1.6%	0.0%	11.8%
12	5.6%	4.2%	1.1%	0.0%	11.0%
13	7.9%	4.0%	1.2%	0.0%	13.1%
14	7.8%	4.2%	1.5%	0.0%	13.4%
15	8.0%	4.8%	2.8%	0.0%	15.5%
16	6.5%	4.9%	4.4%	0.0%	15.8%
17	7.5%	6.7%	4.0%	0.0%	18.2%
18	8.6%	5.5%	3.8%	0.2%	18.1%
19	9.1%	5.8%	4.6%	0.6%	20.2%
20	8.1%	5.4%	4.9%	0.8%	19.3%
21	8.6%	6.3%	2.7%	0.3%	17.9%
22	3.9%	4.3%	0.1%	0.0%	8.3%
23	2.9%	6.3%	0.5%	0.0%	9.7%
24	3.4%	5.3%	0.8%	0.0%	9.6%
25	6.5%	5.6%	0.9%	0.0%	13.0%
26	6.0%	5.0%	1.1%	0.0%	12.1%
27	6.3%	4.8%	1.9%	0.0%	13.0%
28	7.9%	4.4%	1.8%	0.0%	14.1%
29	7.8%	4.7%	2.1%	0.0%	14.6%
30	6.5%	5.0%	3.4%	0.0%	14.9%
31	6.2%	5.5%	4.0%	0.0%	15.7%
32	6.8%	5.6%	5.0%	0.0%	17.4%
33	6.6%	5.6%	5.1%	0.0%	17.3%
34	7.6%	4.9%	2.7%	0.1%	15.3%
35	5.3%	2.2%	0.3%	0.0%	7.8%
36	4.4%	3.2%	0.3%	0.0%	7.9%
37	4.0%	3.0%	0.3%	0.0%	7.3%
38	6.5%	4.1%	1.0%	0.0%	11.6%
39	6.3%	3.8%	1.1%	0.0%	11.2%
40	5.6%	5.4%	1.6%	0.0%	12.5%
41	8.1%	5.1%	1.6%	0.0%	14.8%
42	7.9%	5.3%	1.7%	0.0%	15.0%
43	8.8%	5.6%	1.7%	0.0%	16.0%
44	8.0%	6.3%	1.7%	0.0%	16.0%
45	8.1%	7.1%	2.4%	0.0%	17.6%
46	7.1%	6.6%	3.4%	0.0%	17.1%
47	7.8%	5.5%	4.3%	0.0%	17.6%
48	7.2%	6.8%	5.5%	0.2%	19.6%
49	8.1%	6.7%	2.1%	0.2%	17.0%
50	8.2%	9.9%	1.5%	0.0%	19.6%
51	8.0%	10.2%	2.4%	0.0%	20.6%
52	7.3%	10.4%	3.3%	0.0%	21.0%
53	7.0%	9.8%	3.5%	0.0%	20.3%
54	5.6%	8.5%	8.1%	0.0%	22.2%
55	5.4%	6.2%	11.0%	0.4%	22.9%
56	1.1%	1.3%	2.8%	0.3%	5.5%

Figura 9.20. Contribución horizontal por periodo Q2

Periodo	% ID1	% ID2	% ID3	% ID4	% Total
1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
3	4.9%	0.0%	0.0%	0.0%	4.9%
4	8.7%	0.0%	0.0%	0.0%	8.7%
5	8.7%	2.6%	0.0%	0.0%	11.3%
6	9.3%	4.0%	0.0%	0.0%	13.4%
7	8.4%	4.3%	0.0%	0.0%	12.7%
8	4.2%	4.0%	0.1%	0.0%	8.3%
9	3.8%	4.2%	0.7%	0.0%	8.7%
10	3.6%	5.2%	1.0%	0.0%	9.8%
11	6.0%	4.8%	1.5%	0.0%	12.3%
12	6.1%	4.6%	1.4%	0.0%	12.1%
13	4.7%	4.8%	1.2%	0.0%	10.7%
14	7.3%	4.6%	1.2%	0.0%	13.0%
15	8.6%	3.7%	1.9%	0.0%	14.1%
16	7.2%	4.1%	2.9%	0.0%	14.2%
17	6.7%	4.9%	3.8%	0.1%	15.3%
18	7.5%	5.7%	3.8%	0.3%	17.4%
19	8.2%	5.8%	4.2%	0.5%	18.7%
20	8.0%	6.0%	3.0%	0.4%	17.4%
21	8.2%	5.7%	4.3%	0.9%	19.1%
22	7.8%	5.4%	3.3%	0.7%	17.2%
23	4.0%	3.2%	0.0%	0.0%	7.2%
24	3.6%	5.0%	0.1%	0.0%	8.7%
25	5.3%	5.4%	0.4%	0.0%	11.2%
26	6.6%	5.8%	1.0%	0.0%	13.3%
27	5.2%	6.0%	1.0%	0.0%	12.2%
28	7.2%	5.3%	1.3%	0.0%	13.8%
29	7.7%	5.1%	1.6%	0.0%	14.4%
30	7.8%	5.6%	2.2%	0.0%	15.6%
31	7.1%	6.2%	3.2%	0.0%	16.5%
32	7.2%	6.4%	3.4%	0.0%	17.0%
33	6.3%	6.1%	4.7%	0.0%	17.2%
34	7.1%	5.4%	6.1%	0.0%	18.5%
35	7.9%	4.7%	3.1%	0.0%	15.7%
36	4.6%	2.3%	0.3%	0.0%	7.3%
37	3.7%	3.0%	0.2%	0.0%	6.9%
38	4.3%	3.2%	0.4%	0.0%	8.0%
39	6.8%	3.6%	0.9%	0.0%	11.4%
40	6.0%	5.1%	0.9%	0.0%	12.1%
41	6.4%	4.6%	1.1%	0.0%	12.1%
42	8.8%	5.1%	1.4%	0.0%	15.4%
43	8.0%	5.4%	2.1%	0.0%	15.4%
44	7.7%	6.1%	1.9%	0.0%	15.7%
45	6.8%	7.1%	1.8%	0.0%	15.7%
46	9.3%	6.4%	2.5%	0.0%	18.2%
47	7.9%	6.5%	3.2%	0.0%	17.6%
48	7.3%	6.6%	4.1%	0.0%	18.0%
49	8.1%	7.2%	4.5%	0.1%	19.8%
50	7.7%	6.8%	2.5%	0.2%	17.1%
51	7.6%	9.7%	1.4%	0.0%	18.7%
52	8.8%	10.0%	2.1%	0.0%	20.9%
53	6.6%	11.1%	3.2%	0.0%	20.8%
54	7.7%	9.7%	4.5%	0.0%	21.8%
55	5.7%	7.9%	8.3%	0.0%	21.9%
56	5.0%	6.8%	11.4%	0.7%	23.9%
57	6.0%	8.3%	9.2%	1.8%	25.4%

Figura 9.21. Contribución horizontal por periodo Q3

### 9.5. Resultados estudio mezcla horizontal y vertical

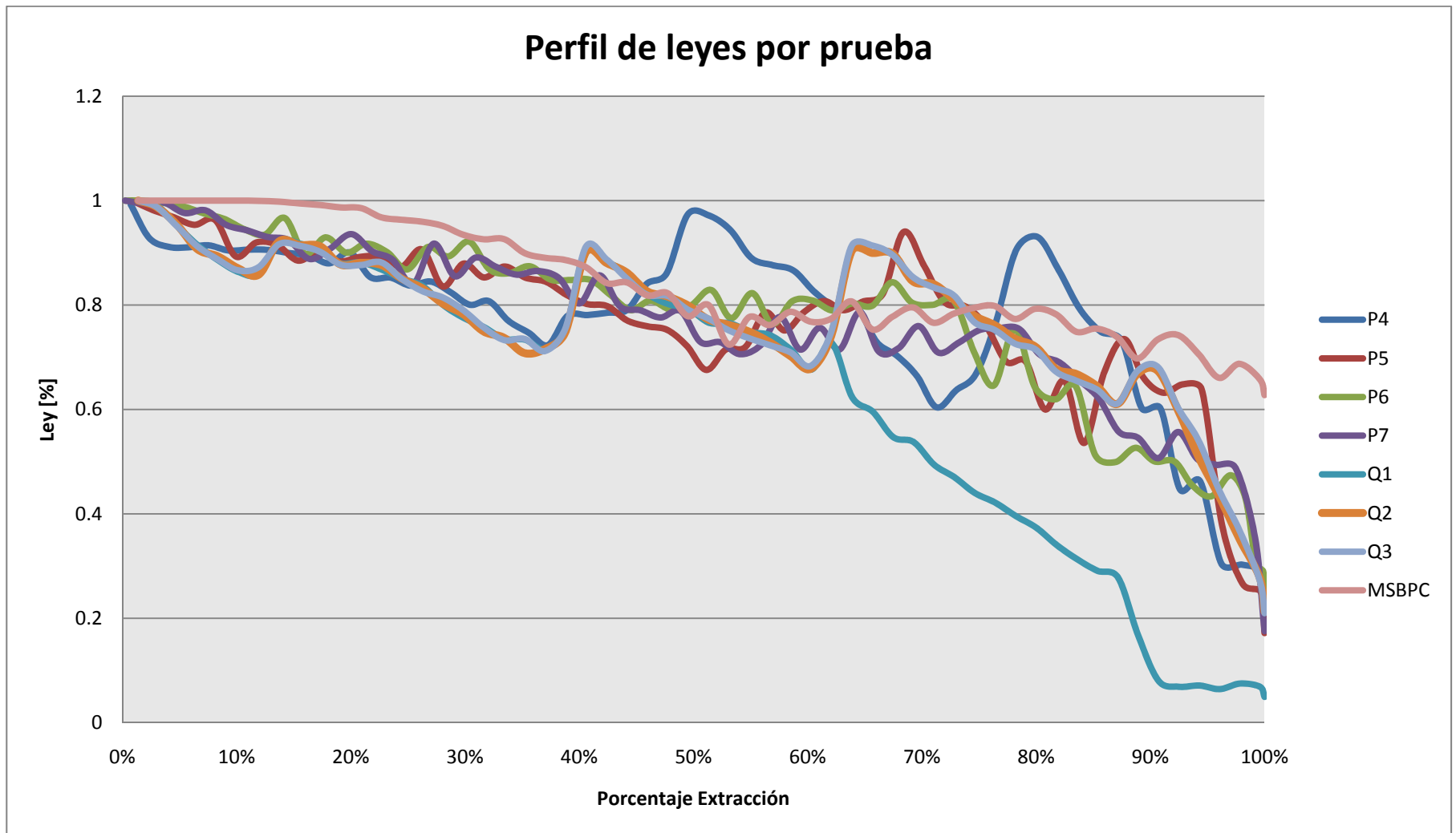


Figura 9.22. Perfil de leyes por prueba por periodo.

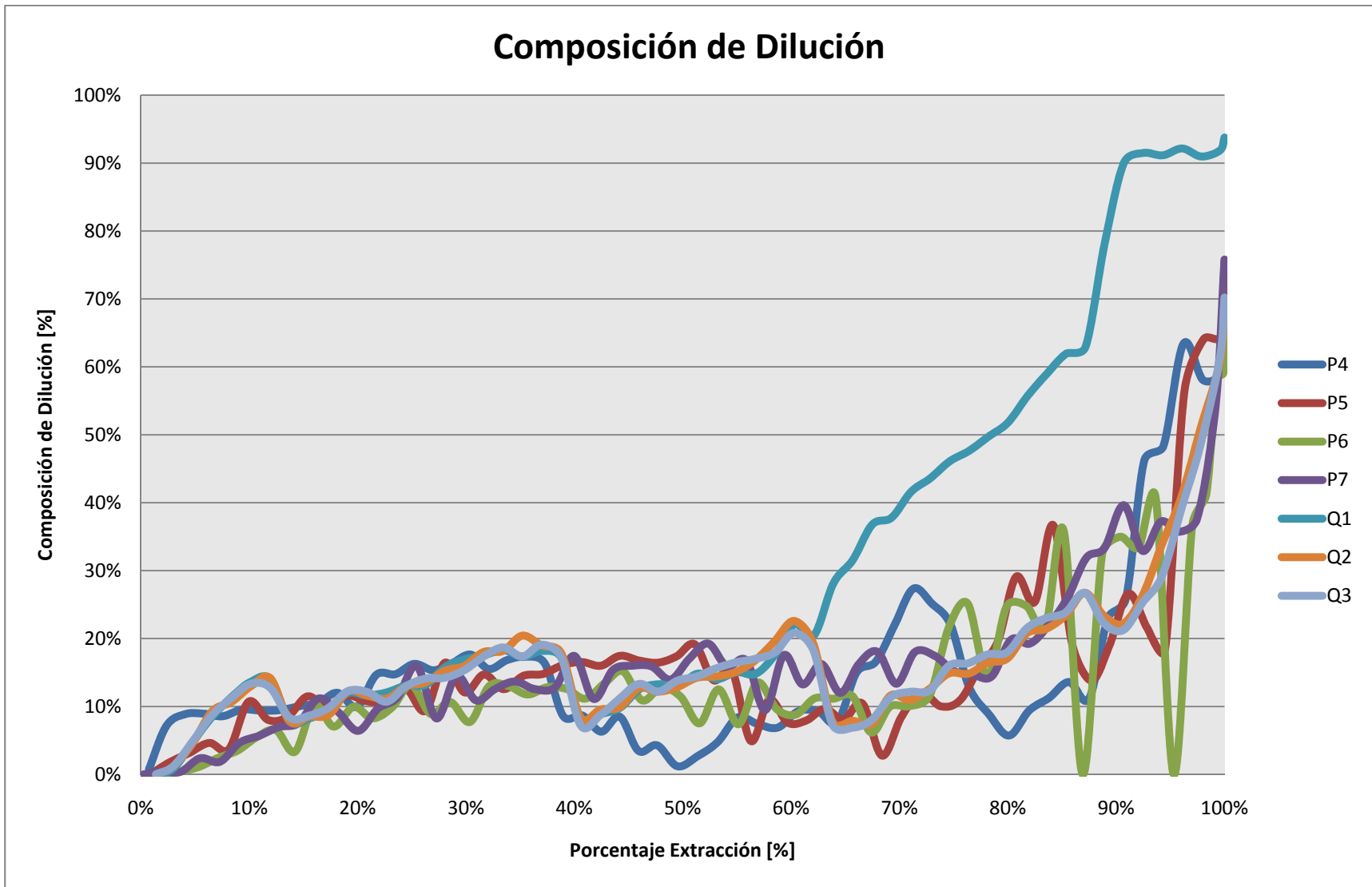


Figura 9.23. Composición de Dilución por prueba.

## 9.6. Valorización Económica

Tabla 9.1. Modelo Económico de MSBPC

Modelo Económico MSBPC			
v1	RM	%	80
v2	Grade Units		2
v3	Process N		1
v4	Procces Cost	\$/t	5
v5	Concentrate	%	26
v6	Concentrate	No.	1
v7	Concenrate Moist	%	2
v8	Freight	\$/t	12
v9	Smelter	\$/t	75
v10	Price Units		2
v11	Price per unit	\$/lb	1.2
v12	Smlt deduction	\$	0.1
v13	Smlt deduction	%	1
v14	Payable	%	97
v15	Refining Cost	\$/ut	0.04
v16	NSR Royalty	%	0



Tabla 9.2. Ejemplo de valorización de columna

IZ	CU	DCU	Base Reve TC	Cu R/C	Fregith	Total Ded	Min+Proc	Revenue Total	Rev. Fact.	
1	1	0.5	9.8	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.1	3.7
2	1	0.5	9.8	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.1	3.7
3	1	0.5	9.7	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.1	3.7
4	1	0.5	9.7	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.1	3.7
5	1	0.5	9.7	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.1	3.6
6	1	0.5	9.6	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.0	3.6
7	1	0.5	9.5	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	1.0	3.5
8	1	0.5	9.4	1.1	0.3	0.2	1.6	8.6	0.9	3.4
9	1	0.5	9.3	1.1	0.3	0.2	1.5	8.5	0.8	3.3
10	1	0.4	9.0	1.0	0.3	0.2	1.5	8.5	0.5	3.0
11	1	0.4	8.5	1.0	0.3	0.2	1.4	8.4	0.1	2.6
12	1	0.4	7.8	0.9	0.3	0.1	1.3	8.3	-0.5	2.0
13	1	0.4	7.2	0.8	0.2	0.1	1.2	8.2	-1.0	1.4
14	0.9	0.3	6.5	0.7	0.2	0.1	1.1	8.1	-1.6	0.8
15	0.8	0.3	5.5	0.6	0.2	0.1	0.9	7.9	-2.5	-0.1
16	0.7	0.2	4.3	0.5	0.2	0.1	0.7	7.7	-3.4	-1.1
17	0.7	0.2	3.6	0.4	0.1	0.1	0.6	7.6	-4.0	-1.8
18	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
19	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
20	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
21	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
28	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
27	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
26	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0
25	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	-7.0	-5.0