



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

**MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN MINAS DE BLOCK/PANEL CAVING**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**PABLO SALVADOR PAREDES MORALES**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER VALLEJOS MASSA  
NELSON MORALES VARELA  
SERGIO FUENTES SEPÚLVEDA**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE, 2012**

## RESUMEN

La dilución es una parte integral de una operación minera de hundimiento y su comportamiento posee implicancias relevantes en todas las etapas de un proyecto minero subterráneo. Los modelos de dilución existentes, han sido construidos sin la consideración de parámetros que pueden definir su entrada y comportamiento posterior, tales como la propagación del caving o la ubicación de la dilución con respecto a un panel a explotar. Esto hace que hoy, la principal herramienta de control de dilución en las minas explotadas por block o panel caving sea la medición de la uniformidad con que se realiza la extracción en términos de tonelaje, la cual resulta insuficiente por sí sola cuando el control de tiraje es sólo una de las variables que dominan la entrada de la dilución.

El objetivo del presente trabajo de tesis consiste en estudiar el comportamiento de la dilución en las operaciones de hundimiento de CODELCO-Chile con el fin de identificar los mecanismos a través de los cuales la dilución ingresa a los puntos de extracción. Para esto, se desarrolló un software de visualización y análisis de datos de operaciones de block y panel caving, denominado Syscave<sup>®</sup>.

A través del análisis de las curvas de dilución observada, las alturas de columna in-situ, la uniformidad y la secuencia con las que se extraen cuatro sectores de El Salvador y el Panel III de Andina, se identificaron tres mecanismos de entrada de la dilución. Dos de ellos ya son conocidos, y corresponden a la entrada vertical desde un sector ubicado encima del panel analizado y a la entrada de dilución acompañada de un estallido de aire debido a la propagación repentina del caving luego de una colgadura.

El tercero corresponde a un nuevo mecanismo identificado como resultado de este trabajo. Éste ocurre cuando el panel se ubica al costado de un sector ya explotado y el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire que permita el ingreso de diluyente y el ángulo de la pila granular permite el flujo lateral del primero, éste viajará hasta puntos de extracción alejados de la interfaz con el material quebrado.

Otra conclusión fundamental de esta tesis, es que la propagación del caving hacia el material diluyente es la principal variable controladora de la entrada de dilución.

De manera de probar la coherencia del mecanismo de entrada lateral de la dilución con la teoría de flujo gravitacional, se utilizó la herramienta numérica de flujo gravitacional REBOP para evaluar la ocurrencia del mecanismo bajo las condiciones impuestas en la hipótesis. Para ello, se comparó el software con datos de ocho sectores productivos y se simuló la extracción histórica de un sector representativo del mecanismo bajo condiciones de propagación de cave back hacia el material quebrado, obteniéndose como resultado la reproducción parcial del mecanismo para algunos puntos de extracción por parte de éste.

Finalmente, a través de un análisis de equilibrio límite se prueba que el proceso que da origen al movimiento lateral del material diluyente es factible desde el punto de vista mecánico bajo las condiciones presentes en una operación de panel caving.

# ABSTRACT

Dilution is an integral part of a cave mining operation and its behavior has important consequences in an underground mining project. The existing dilution models have been built without the consideration of variables that may determine its behavior, such as caving propagation or the original position of the waste before the panel's extraction begins. This leads to the fact that today's caving operations use the uniformity with which the extraction is done as the main dilution control tool, even when draw control is only one of the variables controlling dilution entry behavior.

The objective of this thesis is to study dilution behavior at CODELCO-Chile's caving operations in order to establish the mechanism with which dilution enters at the drawpoints. To do this, Syscave<sup>®</sup>, a tool for mine data visualization and analysis, was built.

After the analysis of the observed dilution curves, the in-situ column heights, the uniformity and the sequence with which four sectors of El Salvador and Andina's Panel III were extracted, it was possible to identify three dilution entry mechanisms. Two of them are known, and correspond to the vertical entry from a sector above the panel under analysis and to dilution entry after an air blast that occurs due to the sudden propagation of the cave back after a hang up.

The third one corresponds to a new mechanism identified as a result of this thesis. It occurs when the panel is located next to an exhausted sector and the cave back propagates to the broken material interface. If an air gap, due to the mismatch between caving propagation and the extraction, allows the broken material to enter the pile and this pile's angle allows the lateral displacement of the material, then broken material will travel along the pile unto drawpoints located far from the broken material interface.

Another fundamental conclusion from this thesis is the fact that the propagation of the cave back to the diluting material is the main variable in dilution entry behavior for a panel cave.

In order to probe the coherence of the lateral dilution entry mechanism with the gravity flow theory, the numerical tool for gravity flow simulation REBOP was used to evaluate the occurrence of the mechanism under the hypothesized conditions. To do this, REBOP was compared to mine data from CODELCO-Chile's operations, and the historical extraction of a representative sector of the mechanism was simulated with cave propagation to the broken material. Results obtained show that the mechanism was reproduced by the simulator, probing its coherence with gravity flow theory.

Finally, a limit equilibrium analysis performed probes that the process that allows the lateral displacement of broken material proposed in the hypothesis is feasible from a mechanic point of view.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos quienes forman parte de la Universidad de Chile, por mantener el espíritu de universidad pública y de calidad al servicio de las necesidades del país.

A CODELCO-Chile por el apoyo financiero durante mi paso por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas a través de sus becas.

A los académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, por su compromiso con la ciencia y la excelencia.

A los académicos y funcionarios del Departamento de Ingeniería de Minas, por realizar el cumplimiento de su labor con el cariño que la tarea merece.

A mi profesor guía, por la confianza, la rigurosidad y el entusiasmo puestos en este trabajo de tesis.

A los miembros de la comisión por su buena disposición y aportes a la mejora de este trabajo.

A todos quienes contribuyeron directamente a este trabajo, en especial a Felipe y María Elena.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, en especial a Miguel, Montserrat, Luis Felipe y Kimie, quienes hicieron de esta última etapa una experiencia cargada de momentos alegres.

A mis amigos y compañeros de universidad, en especial a Arturo, Sebastián y Moyra, por hacer de los días en la escuela una colección de risas a pesar de los momentos difíciles.

A la música, al fútbol, a mis amigos y a Fernanda, por recordarme que el sentido de la vida se encuentra en ser fiel a nuestros principios y que el motor de ésta es el amor en todas sus formas.

A mi familia, por su apoyo en todo momento. En especial a mis padres, por su amor infinito. Cada paso que he dado en esta vida es gracias al amor puesto en cada palabra y acción que me dirigieron.

*A mis padres,  
por su amor.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 INTRODUCCIÓN.....  | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS .....   | 2         |
| 1.2.1 <i>Objetivos Generales</i> .....   | 2         |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....   | 2         |
| 1.3 ALCANCES.....  | 2         |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....   | 3         |
| 1.5 CONTENIDOS DE LA TESIS .....   | 3         |
| <b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES TEÓRICOS .....</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 INTRODUCCIÓN.....  | 5         |
| 2.2 TEORÍA DE FLUJO GRAVITACIONAL .....  | 5         |
| 2.2.1 <i>Elipsoides de extracción y movimiento</i> .....   | 6         |
| 2.2.2 <i>Modelos de flujo</i> .....  | 7         |
| 2.3 TEORÍA DE COMPORTAMIENTO DE LA DILUCIÓN.....   | 10        |
| 2.3.1 <i>Medidas de la dilución</i> .....  | 10        |
| 2.3.2 <i>Parámetros que influyen en el contenido de dilución extraído</i> .....                                  | 10        |
| 2.3.3 <i>Entrada de la dilución</i> .....  | 12        |
| 2.4 MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE LA DILUCIÓN .....   | 14        |
| 2.4.1 <i>Modelo de Laubscher (Laubscher 1994, 2000)</i> .....  | 14        |
| 2.4.2 <i>Modelo de Susaeta (2004)</i> .....  | 17        |
| 2.5 CONTROL DE TIRAJE EN BLOCK/PANEL CAVING .....  | 23        |
| 2.5.1 <i>Etapas de iniciación del caving</i> .....   | 24        |
| 2.5.2 <i>Etapas de régimen</i> .....   | 25        |
| 2.5.3 <i>Índices de uniformidad</i> .....  | 26        |
| 2.6 FUNDAMENTOS DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN REBOP.....   | 27        |
| 2.6.1 <i>Formulación matemática</i> .....  | 27        |
| 2.6.2 <i>Parámetros de entrada</i> .....   | 30        |
| 2.6.3 <i>Validaciones y calibraciones anteriores</i> .....   | 31        |
| 2.7 CONCLUSIONES.....  | 34        |
| <b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>36</b> |
| 3.1 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS Y HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE DATOS DE OPERACIONES DE BLOCK/PANEL CAVING ..... | 36        |
| 3.2 ANÁLISIS DE DATOS DE DILUCIÓN DE OPERACIONES DE BLOCK/PANEL CAVING .....                                     | 37        |
| 3.3 COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS .....  | 38        |
| 3.4 PRUEBA DE PRINCIPALES HIPÓTESIS .....  | 38        |
| <b>CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DE LAS BASES DE DATOS Y HERRAMIENTA DE ANÁLISIS.....</b>                             | <b>40</b> |
| 4.1 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS.....  | 40        |
| 4.1.1 <i>Base de datos para el estudio de los mecanismos de entrada de dilución</i> .....                        | 42        |
| 4.1.2 <i>Base de datos para la comparación de REBOP con datos de minas</i> .....                                 | 43        |
| 4.2 CONSTRUCCIÓN DE HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE MINAS DE BLOCK/PANEL CAVING .....        | 44        |
| 4.2.1 <i>Funcionalidades de la herramienta</i> .....   | 45        |
| <b>CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE MECANISMOS DE ENTRADA DE LA DILUCIÓN.....</b>  | <b>51</b> |
| 5.1 DEFINICIÓN DEL PUNTO DE ENTRADA DE DILUCIÓN .....  | 51        |
| 5.2 ANÁLISIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN EL SALVADOR .....   | 55        |
| 5.2.1 <i>Inca Central Este (ICE)</i> .....   | 56        |
| 5.2.2 <i>Inca Central Oeste (ICW)</i> .....  | 62        |
| 5.2.3 <i>Inca Norte (IN)</i> .....   | 67        |
| 5.2.4 <i>Inca Oeste (IW)</i> .....   | 73        |
| 5.2.5 <i>Resumen hipótesis de entrada de dilución en El Salvador</i> .....                                       | 80        |
| 5.3 ANÁLISIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN ANDINA .....  | 81        |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 5.3.1   | <i>Cluster Parrillas</i> .....  | 83         |
| 5.3.2   | <i>Cluster LHD</i> .....  | 89         |
| 5.3.3   | <i>Resumen hipótesis de entrada de dilución en Andina</i> .....   | 96         |
| 5.4   | HIPÓTESIS DE MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN .....  | 97         |
| 5.5   | VARIABLES QUE CONTROLAN LOS MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN .....   | 99         |
| 5.5.1   | <i>Formación de un espacio de aire y desplazamiento lateral de la dilución durante el quiebre</i><br><i>100</i> |            |
| 5.5.2   | <i>Cantidad de mineral expuesto a diluirse y diferencias entre alturas de columna</i> .....                     | 102        |
| 5.5.3   | <i>Tasa de percolación y uniformidad de la extracción en régimen</i> .....                                      | 102        |
| 5.5.4   | <i>Factores adimensionales de los fenómenos de entrada de dilución</i> .....                                    | 102        |
| <b>CAPÍTULO 6: COMPARACIÓN DE HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE FLUJO GRAVITACIONAL REBOP CON DATOS DE MINAS</b> ..... |   | <b>104</b> |
| 6.1   | REVISIÓN PRÁCTICA DE REBOP .....  | 104        |
| 6.1.1   | <i>Tiraje aislado</i> .....   | 105        |
| 6.1.2   | <i>Tiraje múltiple</i> .....  | 105        |
| 6.1.3   | <i>Conclusiones y recomendaciones de la revisión práctica</i> .....   | 109        |
| 6.2   | DEFINICIÓN DE ÍNDICES DE COMPARACIÓN .....  | 110        |
| 6.2.1   | <i>Error cuadrático medio</i> .....   | 110        |
| 6.2.2   | <i>Error relativo medio</i> .....   | 110        |
| 6.2.3   | <i>Confiability</i> .....   | 110        |
| 6.3   | SIMULACIÓN DE EXTRACCIÓN HISTÓRICA DE SECTORES Y COMPARACIÓN CON DATOS MINA .....                               | 111        |
| 6.3.1   | <i>Comparación con sectores de El Teniente</i> .....  | 111        |
| 6.3.2   | <i>Comparación con sectores de El Salvador</i> .....  | 113        |
| 6.3.3   | <i>Comparación con Panel III de Andina</i> .....  | 115        |
| 6.3.4   | <i>Resumen de resultados de comparación con sectores de base de datos</i> .....                                 | 119        |
| 6.4   | CONCLUSIONES DE COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS .....   | 120        |
| <b>CAPÍTULO 7: PRUEBA DE HIPÓTESIS DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN LATERAL</b> ..                             |   | <b>121</b> |
| 7.1   | ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE DE AIR GAP Y DESPLAZAMIENTO SOBRE LA PILA .....                                   | 121        |
| 7.1.1   | <i>Suma de fuerzas desestabilizadoras <math>F_D</math></i> .....  | 123        |
| 7.1.2   | <i>Suma de fuerzas estabilizadoras <math>F_E</math></i> .....   | 124        |
| 7.1.3   | <i>Factor de seguridad FS</i> .....   | 125        |
| 7.1.4   | <i>Desplazamiento lateral sobre la pila</i> .....   | 126        |
| 7.2   | SIMULACIÓN EN REBOP CON PROPAGACIÓN DE CAVE BACK DIFERENCIADA .....   | 127        |
| 7.3   | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....  | 131        |
| <b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y ENFOQUE FUTURO</b> .....  |   | <b>132</b> |
| 8.1   | CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS .....   | 132        |
| 8.2   | RECOMENDACIONES Y ENFOQUE FUTURO .....  | 133        |
| 8.2.1   | <i>Mecanismos de entrada de dilución</i> .....  | 134        |
| 8.2.2   | <i>REBOP como herramienta de flujo</i> .....  | 134        |
| <b>REFERENCIAS</b> .....  |   | <b>136</b> |
| <b>ANEXO A: RESULTADOS REVISIÓN PRÁCTICA DE REBOP</b> .....   |   | <b>139</b> |
| <b>ANEXO B: RESULTADOS COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS</b> .....  |   | <b>142</b> |
| B.1   | EL TENIENTE .....   | 142        |
| B.2   | EL SALVADOR .....   | 147        |
| B.3   | ANDINA .....  | 158        |
| <b>ANEXO C: RESULTADOS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN LATERAL</b> .....               |   | <b>168</b> |
| C.1   | ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE DE AIR GAP .....  | 168        |
| C.2   | SIMULACIONES CON PROPAGACIÓN DE CAVE BACK DIFERENCIADA .....  | 171        |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Resumen índices de uniformidad .....   | 26  |
| Tabla 2: Sets de parámetros para calibración REBOP (Vargas, 2010) .....                                   | 31  |
| Tabla 3: Resumen modelos de dilución .....  | 35  |
| Tabla 4: Información colectada de las operaciones de CODELCO-Chile .....                                  | 40  |
| Tabla 5: Datos eliminados de la base de datos original .....  | 41  |
| Tabla 6: Estadísticas de base datos de dilución para El Salvador .....                                    | 43  |
| Tabla 7: Estadísticas de base de datos de dilución para Andina .....                                      | 43  |
| Tabla 8: Estadísticas de extracción para base de datos de El Teniente .....                               | 43  |
| Tabla 9: Estadísticas de extracción para base de datos de Andina .....                                    | 43  |
| Tabla 10: Estadísticas de extracción para base de datos de El Salvador .....                              | 44  |
| Tabla 11: Resumen de distribución de sectores en la base de datos .....                                   | 44  |
| Tabla 12: Matriz de uniformidad para Syscave®.....  | 50  |
| Tabla 13: Conteo de comportamientos de curvas de dilución observada .....                                 | 52  |
| Tabla 14: Número de puntos con dilución declarada con criterio acumulado .....                            | 54  |
| Tabla 15: Estadísticas de dilución extraída ICE .....   | 58  |
| Tabla 16: Estadísticas de dilución extraída ICW .....   | 63  |
| Tabla 17: Estadísticas de dilución extraída IN.....   | 69  |
| Tabla 18: Estadísticas de dilución extraída IW .....  | 75  |
| Tabla 19: Resumen de hipótesis de entrada de dilución en El Salvador.....                                 | 80  |
| Tabla 20: Resumen de índices análisis de dilución El Salvador.....  | 80  |
| Tabla 21: Estadísticas tonelajes y leyes de Cu extraídas Cluster Parrillas .....                          | 84  |
| Tabla 22: Estadísticas de dilución extraída Cluster Parrillas .....                                       | 85  |
| Tabla 23: Estadísticas de extracción de tonelajes y leyes de Cu Cluster LHD .....                         | 90  |
| Tabla 24: Estadísticas de dilución extraída Cluster LHD.....  | 91  |
| Tabla 25: Resumen de hipótesis de entrada de dilución en Andina.....                                      | 96  |
| Tabla 26: Resumen índices de análisis de dilución Andina.....   | 97  |
| Tabla 27: Factores adimensionales agrupados por fenómeno en la entrada de dilución .....                  | 103 |
| Tabla 28: Simulación de material remanente como función de espaciamiento entre puntos (Vargas, 2010)..... | 106 |
| Tabla 29: Información de extracción y propagación de cave back para sectores de El Teniente .....         | 107 |
| Tabla 30: Sets de Parámetros para análisis de influencia de Cave Back y porosidad en simulaciones.....    | 107 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 31: Conclusiones y recomendaciones de revisión práctica de REBOP, Castro y Paredes (2012).....  | 109 |
| Tabla 32: Relaciones k1 y k2 calculadas para sectores de El Teniente.....   | 112 |
| Tabla 33: Parámetros simulaciones de sectores El Teniente.....  | 112 |
| Tabla 34: Sets de parámetros para simulaciones de sectores El Salvador.....   | 114 |
| Tabla 35: Resumen análisis de entrada de quebrado en puntos de extracción de simulaciones El Salvador .....   | 115 |
| Tabla 36: Sets de parámetros para simulaciones Panel III .....  | 116 |
| Tabla 37: Resumen de comparaciones de entrada de dilución a escala de puntos de extracción en simulaciones de clusteres de dilución Panel III.....                                  | 117 |
| Tabla 38: Parámetros ajustados de REBOP a operaciones de CODELCO y errores de estimación asociados .....  | 119 |
| Tabla 39: Conclusiones derivadas de la comparación de REBOP con datos de operaciones de CODELCO-Chile.....  | 120 |
| Tabla 40: Valores de parámetros geomecánicos del material quebrado proveniente del Panel II de Andina .....   | 125 |
| Tabla 41: Ángulos de fricción materiales Panel II y Panel III Andina.....   | 127 |
| Tabla 42: Confiabilidad y PEQ(3%) medio para datos minas, set 5, simulación 1 y simulación 2 .....  | 130 |
| Tabla 43: Errores para tonelajes extraídos en simulaciones de El Teniente.....  | 142 |
| Tabla 44: Errores para leyes de Cu extraídas en simulaciones de El Teniente .....   | 142 |
| Tabla 45: Resumen de resultados de simulaciones para sector Inca Central Este.....  | 147 |
| Tabla 46: Resumen de resultados de simulaciones para sector Inca Central Oeste ....   | 148 |
| Tabla 47: Resumen de resultados de simulaciones para sector Inca Norte.....   | 149 |
| Tabla 48: Resumen de resultados de simulaciones para sector Inca Oeste.....   | 150 |
| Tabla 49: Errores en leyes de Cu extraídas para simulaciones de Panel III .....   | 159 |
| Tabla 50: Errores en tonelajes extraídos para simulaciones de Panel III.....  | 159 |
| Tabla 51: Errores en dilución extraída para simulaciones de Cluster LHD .....   | 160 |
| Tabla 52: Errores en dilución extraída para simulaciones de Cluster Parrillas.....  | 160 |
| Tabla 53: Confiabilidad, Error cuadrático medio y media de PER(3%) y PEQ(3%) para simulaciones de Cluster LHD (CL) y Cluster Parrillas (CP) por áreas.....                          | 167 |
| Tabla 54: Factor de seguridad en función de ángulo de falla y altura de air gap para altura de sobrecarga de 5 (m) con parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina .....  | 168 |
| Tabla 55: Factor de seguridad en función de ángulo de falla y altura de air gap para altura de sobrecarga de 10 (m) con parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina ..... | 168 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 56: Factor de seguridad en función de ángulo de falla y altura de air gap para altura de sobrecarga de 50 (m) con parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina .....  | 169 |
| Tabla 57: Factor de seguridad en función de ángulo de falla y altura de air gap para altura de sobrecarga de 100 (m) con parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina .....   | 169 |
| Tabla 58: Masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura de air gap con los parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina para una altura de sobrecarga de 5 (m) .....   | 169 |
| Tabla 59: Masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura de air gap con los parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina para una altura de sobrecarga de 10 (m) .....  | 170 |
| Tabla 60: Masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura de air gap con los parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina para una altura de sobrecarga de 50 (m) .....  | 170 |
| Tabla 61: Masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura de air gap con los parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina para una altura de sobrecarga de 100 (m) ..... | 171 |
| Tabla 62: Desplazamiento de marcadores de quebrado en simulación 2 (Parte 1) .....   | 171 |
| Tabla 63: Desplazamiento de marcadores de quebrado en simulación 2 (Parte 2) .....   | 172 |
| Tabla 64: Desplazamiento de marcadores de quebrado en simulación 3 (Parte 1) .....   | 173 |
| Tabla 65: Desplazamiento de marcadores de quebrado en simulación 3 (Parte 2) .....   | 174 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Relaciones geométricas elipsoides de extracción y movimiento (Kvapil, 1992) .  | 7  |
| Figura 2: Extracción de múltiples puntos, zona interactiva y de flujo en masa (Laubscher, 2000) .....  | 9  |
| Figura 3: Mecanismo de difusión de vacíos, zona de mezcla intermedia y de flujo en masa (Laubscher, 2000) .....  | 9  |
| Figura 4: Razón volumen mineral y área de contacto mineral-diluyente (Laubscher, 2000) .....   | 12 |
| Figura 5: Entrada lateral de dilución en block y panel caving (Laubscher, 2000).....   | 12 |
| Figura 6: Fenómeno de rilling (DeWolfe, 1981).....   | 13 |
| Figura 7: Altura de interacción (HIZ) (Laubscher, 1994) .....  | 15 |
| Figura 8: Factor de control de tiraje (dcf) (Laubscher, 1994).....   | 16 |
| Figura 9: Modelo esquemático de curvas de mezcla utilizadas en el modelo de laubscher (Vargas, 2010).....  | 17 |
| Figura 10: Velocidades de tiraje experimentos de arena (Susaeta, 2004) .....   | 19 |
| Figura 11: Comportamiento de flujo según diferencia de velocidades (Susaeta, 2004)..   | 19 |
| Figura 12: Comportamiento de dilución según modelo de flujo, adaptado de Susaeta (2004).....   | 20 |
| Figura 13: Matriz de uniformidad, adaptado de Susaeta (2004).....  | 21 |
| Figura 14: Relación entre G.I. e I.U. (Susaeta, 2004) .....  | 22 |
| Figura 15: Relación entre I.U. y PED (Susaeta, 2004) .....   | 22 |
| Figura 16: Relación entre pedza e I.U., sector a parrillas andina (Susaeta, 2004).....   | 23 |
| Figura 17: Sección vertical a través de una columna de extracción en que se muestra a) Pila llena de material quebrado, b) Formación de un "air gap" por la extracción, y c) Llenado del vacío por la propagación del cave back (Brown, 2007)..... | 25 |
| Figura 18: Ilustración conceptual de formulación de IMZ .....  | 28 |
| Figura 19: Procedimiento realizado para la estimación del error ponderado (Vargas, 2010) .....   | 33 |
| Figura 20: Diagrama de flujo metodología experimental .....  | 39 |
| Figura 21: Clusteres de dilución - Vista en planta puntos de extracción Panel III .....  | 42 |
| Figura 22: Diagrama de flujo del diseño conceptual de Syscave® .....   | 45 |
| Figura 23: Diagrama de Voronoi .....   | 46 |
| Figura 24: Algoritmo para generación de puntos: Malla de puntos extendidos y ejecución de Voronoi. (Navarro, 2011).....  | 47 |
| Figura 25: Proyección de un punto a un plano de triangulación (Navarro, 2011).....   | 47 |
| Figura 26: a) Cálculo altura de columna, b) Centroides de un bloque, c) Área de un punto intersectada.....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 27: Curvas de dilución para punto ICE0311W, donde: a) Porcentaje de dilución observada en función de porcentaje de extracción, b) Porcentaje de dilución acumulada en función de porcentaje de extracción ..... | 49 |
| Figura 28: Pantalla de trabajo de Syscave® .....   | 50 |
| Figura 29: Curvas de dilución observada de dos puntos de extracción: a) Comportamiento en forma de pulso, y b) Comportamiento de ingreso continuo.....   | 52 |
| Figura 30: a) Curvas de dilución observada de dos puntos de extracción, b) Curvas de dilución acumulada de los mismos puntos de extracción .....   | 53 |
| Figura 31: Ilustración de PED declarado al 3% y 5% de la curva de dilución acumulada para un punto de extracción, donde se muestra: a) Curva de dilución acumulada, y b) Curva de dilución observada .....             | 54 |
| Figura 32: Vista en planta sectores de El Salvador.....  | 55 |
| Figura 33: Vista isométrica de superficies de contacto entre material in-situ y quebrado para sectores de El Salvador .....  | 56 |
| Figura 34: Tonelaje y leyes de Cu extraídas ICE .....  | 57 |
| Figura 35: Vistas en planta de puntos de extracción de ICE, donde se muestra: a) Alturas de columna in-situ, y b) Secuencia de extracción .....  | 57 |
| Figura 36: Toneladas y contenido de dilución extraídos ICE .....   | 58 |
| Figura 37: Vista en planta de Porcentaje de uniformidad (en tiraje uniforme) ICE.....  | 59 |
| Figura 38: Histograma y estadísticas de Porcentaje de Uniformidad para puntos interiores de ICE.....   | 59 |
| Figura 39: Vista en planta PED(3%) para puntos de extracción de ICE.....   | 60 |
| Figura 40: Perfil de calle 3-E ICE. El estado de los puntos de extracción es: P: En producción; TO: Terminado por razones operacionales; OP: Pique de Vaciado; TG: Terminado por razones geomecánicas .....            | 60 |
| Figura 41: ICE: PED(3%) v/s Porcentaje de Uniformidad para: a) Alturas de columna in-situ entre 101 y 150 (m), y b) Alturas de columna in-situ de 200 (m) y mayores.....   | 61 |
| Figura 42: Toneladas y contenido de dilución extraídos por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado ICE .....   | 61 |
| Figura 43: Tonelaje y leyes de cobre extraídos ICW .....   | 62 |
| Figura 44: Vistas en planta de puntos de extracción de ICW, donde se muestran: a) Alturas de columna in-situ, y b) Secuencia de extracción .....   | 63 |
| Figura 45: Zonas de alturas de columna in-situ ICW.....  | 63 |
| Figura 46: Toneladas y contenido de dilución extraídos ICW .....   | 64 |
| Figura 47: Vista en planta de Porcentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) ICW .....   | 64 |
| Figura 48: Histograma y estadísticas de Porcentaje de Uniformidad para puntos interiores de ICW.....   | 65 |
| Figura 49: Vista en planta PED(3%) para puntos extracción de ICW.....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 50: Perfil de la calle 11-W del sector ICW, El estado de los puntos de extracción es: P: En producción; RD: Restringido por dilución; TO: Terminado por razones operacionales; PC: Proceso de cierre; ME: Mal estado; TG: Terminado por razones gomecánicas .....    | 66 |
| Figura 51: ICW: PED(3%) v/s Porcentaje de uniformidad para: a) Alturas de columna in-situ menores que 100 (m), y b) Alturas de columna in-situ entre 115 (m) y 150 (m) .....  | 66 |
| Figura 52: Toneladas y contenido de dilución extraídos por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado ICW .....  | 67 |
| Figura 53: Tonelajes y leyes de Cu extraídos IN.....  | 68 |
| Figura 54: Vistas en planta de puntos de extracción de IN, donde se muestran: a) Alturas de columna in-situ, y b) secuencia de extracción .....   | 68 |
| Figura 55: Toneladas y contenido de dilución extraídos IN.....  | 69 |
| Figura 56: Vista en planta de Procentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) IN.....  | 70 |
| Figura 57: Histograma y Estadísticas de Porcentaje de Uniformidad para puntos interiores de IN .....  | 70 |
| Figura 58: Vista en planta PED(3%) para puntos de extracción IN.....  | 71 |
| Figura 59: Perfil de la Calle 6-W de sector IN, el estado de los puntos de extracción es: P: En producción; PC: En proceso de cierre; OP: Punto de vaciado; TD: Terminado por dilución; TG: Terminado por razones gomecánicas; TO: Terminado por razones operacionales..... | 71 |
| Figura 60: IN: PED(3%) v/s Porcentaje de Uniformidad, para: a) Alturas de columna in-situ de 40 a 100 (m), b) Alturas de columna in-situ de 101 a 139 (m), y c) Alturas de columna in-situ de 140 a 150 (m) .....   | 72 |
| Figura 61: Toneladas y contenido de dilución extraídos por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado IN .....   | 73 |
| Figura 62: Tonelajes y leyes de Cu extraídos IW .....   | 74 |
| Figura 63: Vistas en planta de puntos de extracción de IW, donde se muestran: a) Alturas de columna in-situ, y b) Secuencia de extracción .....   | 74 |
| Figura 64: Toneladas y contenido de dilución extraídos IW .....   | 75 |
| Figura 65: Secuencia de eventos de colapso y estallido de aire en el comienzo de la secuencia de IW (De Nicola y Fishwick, 2000).....   | 76 |
| Figura 66: Vista en planta de Porcentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) IW .....   | 77 |
| Figura 67: Histograma y estadísticas de porcentaje de Uniformidad para puntos interiores de IW .....  | 77 |
| Figura 68: Vista en planta PED(3%) para puntos de extracción IW .....   | 78 |
| Figura 69: IW: PED(3%) v/s Porcentaje de Uniformidad, para: a) Alturas de columna in-situ entre 110 y 160 (m), y b) Alturas de columna in-situ entre 201 y 260 (m) .....  | 78 |
| Figura 70: Toneladas y contenido de dilución extraídos por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado IW .....   | 79 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 71: Vista en planta puntos de extracción de Panel III, donde se muestra: Contacto Primario - Secundario y ubicación espacial de clusteres de dilución .....  | 81 |
| Figura 72: Vista en planta puntos de extracción de Panel III, donde se muestran distintos tipos de malla de extracción y niveles de hundimiento.....  | 82 |
| Figura 73: Vista en planta secuencia de extracción Panel III Andina .....   | 82 |
| Figura 74: Vista isométrica de superficies de contacto entre la roca in-situ, el material quebrado y la chimenea riolítica; Clusteres de dilución (en rojo) .....   | 83 |
| Figura 75: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Cluster Parrillas .....  | 84 |
| Figura 76: Vistas en planta puntos de extracción Cluster Parrillas, donde se muestran: a) Alturas de columna in-situ, y b) Secuencia de extracción .....  | 84 |
| Figura 77: Contenido de dilución extraído Cluster Parrillas.....  | 85 |
| Figura 78: Vista en planta de porcentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) Cluster Parrillas .....  | 86 |
| Figura 79: Histograma y estadísticas de Porcentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) para Cluster Parrillas.....  | 86 |
| Figura 80: Vista en planta PEQ(3%) para puntos de extracción de Cluster Parrillas y curvas de nivel de quebrado .....   | 87 |
| Figura 81: Perfil cruzado 116 de Cluster Parrillas donde se observan puntos de extracción sin sombra de quebrado con PEQ(3%) bajo. La batea 36E corresponde al panel colindante al cluster explotado entre 2001 y 2003..... | 87 |
| Figura 82: Vista en planta PER(3%) para puntos de extracción de Cluster Parrillas y curvas de nivel de riolita .....  | 88 |
| Figura 83: Relación entre PER(3%) y PEQ(3%) para puntos del sur del Cluster Parrillas .....   | 88 |
| Figura 84: contenido de quebrado extraído por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado Cluster Parrillas .....   | 89 |
| Figura 85: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Cluster LHD.....   | 90 |
| Figura 86: Vistas en planta de puntos de producción de Cluster LHD, donde se muestran: a) Alturas de columna in-situ, y b) Secuencia de extracción .....  | 90 |
| Figura 87: Contenido de dilución extraído en Cluster LHD .....  | 91 |
| Figura 88: Vista en planta de Porcentaje de Uniformidad (en tiraje uniforme) para puntos de extracción de Cluster LHD.....  | 92 |
| Figura 89: Histograma y Estadísticas de Porcentaje de Uniformidad para puntos de extracción del Cluster LHD.....  | 92 |
| Figura 90: Vista en planta PEQ(3%) para puntos de extracción del Cluster LHD y curvas de nivel de quebrado.....   | 93 |
| Figura 91: Perfil de la calle 69W del Cluster LHD. Las bateas 47 y 48 corresponden al panel contiguo que comienza su extracción en 2005.....  | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 92: Vistas en planta PER(3%) puntos de extracción de Cluster LHD y curvas de nivel de quebrado.....  | 94  |
| Figura 93: Relación entre PER(3%) y PEQ(3%) para puntos de extracción del sureste del Cluster LHD.....  | 95  |
| Figura 94: contenido de quebrado extraído por puntos con entrada de dilución declarada con el criterio del 3% acumulado Cluster LHD .....   | 95  |
| Figura 95: Vistas en planta áreas de clusteres Andina, donde se muestra: a) Áreas de Cluster LHD, y b) Áreas de Cluster Parrillas .....   | 96  |
| Figura 96: Perfiles conceptuales de secuencia de mecanismo de entrada de dilución vertical.....   | 98  |
| Figura 97: Perfiles conceptuales de secuencia de mecanismo de entrada de dilución lateral .....   | 98  |
| Figura 98: Perfiles conceptuales de secuencia de mecanismo de entrada de dilución posterior a un evento de colgadura (adaptado de De Nicola y Fishwick, 2000) .....   | 99  |
| Figura 99: a) Perfil conceptual de pendiente entre las alturas de pila de 2 bateas contiguas; b) Vista en planta conceptual de secuencia de extracción.....   | 102 |
| Figura 100: Parámetros utilizados en las simulaciones de tiraje aislado.....  | 105 |
| Figura 101: Superficies de cave back para área inicial de Diablo Regimiento, (Castro y Paredes, 2012).....  | 106 |
| Figura 102: Resultados análisis de sensibilidad de Cave Back y Porosidad en Área inicial de sector Diablo Regimiento .....  | 107 |
| Figura 103: Imágenes de resultados de sensibilidad para porosidad máxima en área inicial del sector Diablo Regimiento .....   | 108 |
| Figura 104: Relaciones entre altura de cave back y tonelaje acumulado para sectores de El Teniente .....  | 112 |
| Figura 105: Vistas en planta de PEQ(3%) de simulaciones comparativas para clusteres de dilución Panel III, done se muestra: a) Simulación de clusteres incluyendo Panel III completo para Set 5, y b) Simulación de clusteres aislados para Set 5 .....       | 118 |
| Figura 106: Perfil conceptual de análisis de equilibrio límite de Air Gap sobre superficie lineal de falla de ancho unitario .....  | 122 |
| Figura 107: Diagrama de fuerzas desestabilizadoras sobre la superficie lineal de falla  | 123 |
| Figura 108: Diagrama de fuerzas estabilizadoras sobre la superficie lineal de falla .....   | 124 |
| Figura 109: Factor de seguridad como función de ángulo de falla para distintas alturas de air gap con parámetros geotécnicos de material quebrado de Andina, con altura de sobrecarga: a) de 5 (m), b) de 10(m), c) de 50 (m), y d) de 100 (m) .....          | 126 |
| Figura 110: a) Vista en planta de asignación a puntos de extracción de relación de metros quebrados por metro extraído para simulación 1 de Cluster Parrillas, b) Relación de metros quebrado por metro extraído para simulación 1 de Cluster Parrillas ..... | 128 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 111: a) vista en planta de asignación a puntos de extracción de relación de metros quebrados por metro extraído para simulación 3 de cluster parrilla, b) relación de metros quebrados por metro extraído para simulación 3 de cluster parrillas .....                         | 128 |
| Figura 112: Ilustración de propagación de cave back en el tiempo para simulación 1 de Cluster Parrillas, donde se muestra: a) vista en planta de la ubicación de la sección vertical, b) Sección vertical de propagación de cave back por período .....                               | 129 |
| Figura 113: Sección vertical de Cluster Parrillas donde se muestra: a) RMR de bloques en el Cluster Parrillas, b) Propagación de cave back por período para simulación 2 de Cluster Parrillas, y c) Propagación de cave back por período para simulación 3 de Cluster Parrillas ..... | 129 |
| Figura 114: Vistas en planta de PEQ(3%) Cluster Parrillas, donde se muestran: a) Datos mina, b) Set 5 propagación vertical uniforme de CB, c) Simulación 1 con propagación diferenciada de CB, y d) Simulación 2 con propagación diferenciada y colgadura de CB .....                 | 130 |
| Figura 115: Simulaciones de tiraje aislado en REBOP. Condiciones: Altura de columna = 600 (m), Masa extraída = 600,000 (t) .....  | 139 |
| Figura 116: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para diferentes fragmentaciones.....   | 139 |
| Figura 117: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para diferentes porosidades máximas. Condición: masa extraída = 300,000 (t) .....  | 140 |
| Figura 118: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para diferentes ángulos de fricción. Condición: masa extraída = 300,000 (t) .....  | 140 |
| Figura 119: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para distinta sobrecarga. Condición: masa extraída = 300,000 (t) .....   | 140 |
| Figura 120: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para distintos anchos de carguío. Condición: masa extraída = 300,000 (t) .....   | 141 |
| Figura 121: Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para distintos ángulos de batea. Condición: masa extraída = 300,000 (t) .....  | 141 |
| Figura 122: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Diablo Regimiento .....   | 143 |
| Figura 123: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Esmeralda .....   | 143 |
| Figura 124: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Reservas Norte.....   | 144 |
| Figura 125: Tonelajes extraídos y simulados Diablo Regimiento .....   | 144 |
| Figura 126: Tonelajes extraídos y simulados Esmeralda .....   | 145 |
| Figura 127: Tonelajes extraídos y simulados Reservas Norte .....  | 145 |
| Figura 128: Leyes de Cu extraídas y simuladas Diablo Regimiento .....   | 146 |
| Figura 129: Leyes de Cu extraídas y simuladas Esmeralda.....  | 146 |
| Figura 130: Leyes de Cu extraídas y simuladas Reservas Norte.....   | 146 |
| Figura 131: Tonelajes extraídos y simulados sector Inca central Este.....   | 151 |
| Figura 132: Tonelajes extraídos y simulados sector Inca Central Oeste.....  | 151 |
| Figura 133: Tonelajes extraídos y simulados sector IN.....  | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 134: Tonelajes extraídos y simulados sector IW .....  | 152 |
| Figura 135: Leyes de Cu extraídas y simuladas sector Inca Central Este .....                         | 152 |
| Figura 136: Leyes de Cu extraídas y simuladas sector Inca central Oeste .....                        | 152 |
| Figura 137: Leyes de Cu extraídas y simuladas sector Inca Norte .....                                | 153 |
| Figura 138: Leyes de Cu extraídas y simuladas sector Inca Oeste.....                                 | 153 |
| Figura 139: Contenido de dilución extraído y de quebrado simulado sector ICE .....                   | 153 |
| Figura 140: Contenido de dilución extraído y de quebrado simulado sector ICW .....                   | 154 |
| Figura 141: Contenido de dilución extraído y de quebrado simulado sector IN.....                     | 154 |
| Figura 142: Contenido de dilución extraído y de quebrado simulado IW .....                           | 154 |
| Figura 143: Vistas en planta PED(3%) datos mina y PEQ(3%) simulado sector Inca central Este .....    | 155 |
| Figura 144: Vistas en planta PED(3%) datos mina y PEQ(3%) simulado sector Inca Central Oeste .....   | 156 |
| Figura 145: Vistas en planta PED(3%) datos minas y PEQ(3%) simulado sector Inca Norte .....          | 157 |
| Figura 146: Vistas en planta PED(3%) datos mina y PEQ(3%) simulado sector Inca Oeste.....            | 158 |
| Figura 147: Tonelajes y leyes de Cu extraídos Panel III Andina .....                                 | 161 |
| Figura 148: Leyes de Cu extraídas y simuladas Panel III .....  | 161 |
| Figura 149: Tonelajes extraídos y simulados Panel III .....  | 162 |
| Figura 150: Contenido de riolita simulado y extraído Cluster LHD .....                               | 162 |
| Figura 151: Contenido de quebrado extraído y simulado Cluster LHD .....                              | 163 |
| Figura 152: Contenido de riolita extraído y simulado Cluster LHD .....                               | 163 |
| Figura 153: Contenido de quebrado extraído y simulado Cluster Parrillas.....                         | 164 |
| Figura 154: Vistas en planta PEQ(3%) Datos mina y simulaciones Clusteres de dilución Panel III ..... | 165 |
| Figura 155: Vistas en planta PER(3%) datos mina y simulaciones clusteres de dilución Panel III ..... | 166 |

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

De manera general, la dilución es una variable presente en todos los métodos de explotación de minas y posee implicancias múltiples en todas las etapas de un proyecto minero. Desde el punto de vista del diseño minero, la dilución afecta la definición del método de explotación por cuanto es una de las variables que define la selectividad que debe poseer el método elegido. Por otra parte, la selectividad en una operación minera es inversamente proporcional a la productividad y directamente proporcional a los costos de explotación. Así, las características del material que sea considerado como dilución inciden en la escala productiva y la rentabilidad de cualquier explotación minera. Además, desde el punto de vista del procesamiento de minerales y la sustentabilidad de la explotación, la composición mineralógica del material que sea considerado como dilución afecta de manera directa los procesos metalúrgicos que deban ser empleados y el manejo de los residuos que resulten de estos mismos.

Una operación minera de hundimiento corresponde a aquella donde el cuerpo mineralizado se hunde de manera natural luego de que se genere la socavación de un área ubicada debajo de éste, recuperando el material fragmentado a través de los puntos de extracción. Esto incluye los métodos de block y panel caving con todas sus variantes, que corresponden a los métodos de explotación subterráneos de más bajo costo (Laubscher, 1994). A medida que el material fragmentado es extraído de los puntos de extracción, el material superior colapsará llenando el vacío generado por la extracción. Entonces ocurrirá una propagación vertical del colapso en respuesta a la remoción continua de material fragmentado a través de los puntos de extracción activos (Brown, 2004). La forma en que el material fragmentado se desplace, desde su posición inicial, anterior a la minería, hasta su posición final en el punto de extracción, dependerá de diversos factores relativos a la geología, la geomecánica, el diseño minero y la estrategia de extracción que se adopte, y tendrá consecuencias importantes en el negocio minero. Así, el estudio de este fenómeno, denominado flujo gravitacional, cobra gran relevancia para la eficiencia y rentabilidad de una operación minera de hundimiento.

La dilución es una parte integral de una operación minera de hundimiento y el objetivo de la operación es minimizarla, sin embargo, dependiendo de su contenido de metal de interés podría ser rentable extraer una mezcla rica en diluyente, en función de aumentar la recuperación de mineral (Laubscher, 2000). Por otra parte, desde el punto de vista de la seguridad minera, la entrada de dilución podría traer consecuencias importantes como el bombeo de barro en los puntos de extracción bajo ciertas condiciones de agua en el macizo rocoso, resultando en graves accidentes en los niveles de producción. El hecho de conocer de antemano el comportamiento que tendrá esta variable frente a distintos escenarios tiene implicancias en distintas etapas de un proyecto minero de hundimiento,

que van desde la definición de las reservas y el diseño minero hasta el control de tiraje y la seguridad durante la operación.

Hoy en día, los nuevos proyectos de hundimiento traen consigo nuevos desafíos en términos del control de la dilución bajo condiciones nunca antes observadas. En este sentido, estudiar los mecanismos a través de los cuales el material diluyente se mueve - desde su posición previa a la explotación hasta su posición final en el punto de extracción- resulta relevante para aproximarse al diseño y la estrategia de extracción que minimicen el contenido de dilución extraído.

## **1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS**

### **1.2.1 Objetivos Generales**

Estudiar y establecer los mecanismos de entrada de dilución a través de una revisión bibliográfica y el análisis de datos de operaciones mineras de block/panel caving. Las principales hipótesis son verificadas mediante una herramienta de simulación numérica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

De manera de cumplir con los objetivos generales, los objetivos específicos son:

- Construcción de bases de datos y de una herramienta para la visualización y análisis de datos de operaciones de block/panel caving.
- Establecimiento de hipótesis de los mecanismos de entrada de dilución en función de la información empírica disponible.
- Comparación de la herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional con los datos provenientes de la mina utilizando la información disponible.
- Verificación de las principales hipótesis desde un punto de vista mecánico y utilizando la herramienta de simulación de flujo gravitacional.

## **1.3 ALCANCES**

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza una base de datos que corresponde al resultado de una colección de éstos en las operaciones de block/panel caving de las divisiones El Salvador, Andina y El Teniente de CODELCO-Chile. Esta información se utiliza tanto para establecer las hipótesis acerca de los mecanismos de entrada de dilución como para la comparación de los datos reales (datos mina) con los resultados de la herramienta de simulación numérica. Los datos anómalos y erróneos deben ser eliminados de la base de datos, sin embargo, se asume que los datos son representativos de las leyes, tonelajes y contenido de dilución tanto en su ubicación inicial en el modelo de bloques como en su ubicación final en el punto de extracción.

La herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional utilizada para verificar las principales hipótesis resultantes del estudio desde el punto de vista de la coherencia con la teoría de flujo gravitacional es REBOP (versión 3.1), una herramienta que se basa en la generación y actualización de zonas de movimiento a través de ecuaciones de balance de masa y que engloba la teoría actual de flujo gravitacional. Ha sido desarrollada por Itasca en el contexto del International Caving Study (ICS) y posteriormente el Mass Mining Technology Project (MMT).

Debido a que REBOP aún no ha sido validada con una amplia gama de datos de operaciones de caving, se hace necesario realizar una etapa de comparación de la herramienta con una base de datos de este tipo de operaciones, de manera de establecer sus alcances. Sin embargo, el objetivo de este trabajo de tesis no es calibrar y validar REBOP como una herramienta de planificación, sino que establecer los alcances y limitaciones relativos a su uso para reproducir el flujo gravitacional ocurrido en un sector y período de tiempo determinados.

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Actualmente, los modelos de comportamiento de dilución existentes han sido contruidos sin la consideración de parámetros que pueden definir en gran medida la entrada y el comportamiento posterior del material diluyente, tales como la propagación del caving o la disposición espacial de la dilución con respecto a un panel previo a ser explotado. Esto hace, entre otras cosas, que hoy en día la principal herramienta de control de dilución en las minas explotadas por block o panel caving sea la medición de la uniformidad con que se lleva a cabo la extracción, la cual resulta insuficiente por sí debido a que el control de tiraje es sólo una de las variables que dominan la entrada de la dilución. Debido a esto, y a la importancia que tiene para el negocio minero el control de la dilución, resulta relevante analizar la información de distintas operaciones de hundimiento teniendo en cuenta variables que no han sido anteriormente consideradas.

El estudio de los registros de extracción de dilución en distintas minas -que presentan diferentes condiciones en lo referente a la ubicación previa a la explotación del material diluyente sobre los puntos de extracción, las condiciones geomecánicas tanto del material diluyente como del mineral y la dirección de avance de la explotación- representa una oportunidad para establecer la causalidad de los distintos comportamientos de la entrada de dilución en los puntos de extracción y, de esta manera, aportar al entendimiento del comportamiento de esta variable tan relevante para una operación minera de hundimiento.

#### **1.5 CONTENIDOS DE LA TESIS**

Los capítulos que componen la tesis con sus respectivos contenidos se presentan a continuación:

**Capítulo 1: Introducción.** Introducción, objetivos, alcances y justificación del trabajo de tesis.

**Capítulo 2: Antecedentes teóricos.** Revisión de los conceptos fundamentales del flujo gravitacional, la teoría del comportamiento de la dilución con los modelos de la literatura, la práctica de control de tiraje en minería de hundimiento y los fundamentos de la herramienta de simulación REBOP.

**Capítulo 3: Metodología experimental.** Formulación de la metodología de trabajo de la tesis.

**Capítulo 4: Construcción de las bases de datos y herramienta de análisis.** Detalle del trabajo de construcción de las bases de datos para el estudio de dilución y para la comparación con REBOP. Definición y construcción fundamental de la herramienta de análisis de datos de minas de block/panel caving.

**Capítulo 5: Estudio de mecanismos de entrada de dilución.** Análisis de datos de dilución de las operaciones de CODELCO-Chile con el objetivo de establecer hipótesis sobre los mecanismos de entrada de dilución en cada sector en función de la evidencia contenida en los datos.

**Capítulo 6: Comparación de herramienta de simulación de flujo gravitacional REBOP con datos de minas.** Definición de índices de comparación y parámetros de entrada para estudio de comparación. Comparación con datos de mina con el objetivo de determinar los parámetros que reproducen de mejor manera el flujo gravitacional para cada sector y las limitaciones de la herramienta de simulación.

**Capítulo 7: Prueba de hipótesis de mecanismo de entrada de dilución lateral.** Análisis de equilibrio límite y de ángulos de fricción con el objetivo de establecer la validez desde el punto de vista mecánico de la hipótesis. Elección de sector para realizar prueba con herramienta de simulación, definición de prueba en función de las características del sector y limitaciones de la herramienta. Conclusión acerca de la validez de la hipótesis.

**Capítulo 8: Conclusiones y enfoque futuro.** Conclusiones finales del trabajo de tesis y recomendaciones relacionadas con el trabajo futuro en el control de la dilución.

# CAPÍTULO 2

---

## ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La revisión de los conceptos teóricos detrás del fenómeno de flujo gravitacional es vital para la comprensión del comportamiento de la dilución en una operación de hundimiento. Tanto la recuperación del mineral como el contenido de dilución extraído en una operación de hundimiento poseen una fuerte dependencia de las características del flujo gravitacional del mineral y del material diluyente (Julin, 1992). De igual forma, los principales factores que afectan tanto la entrada de material diluyente como su comportamiento posterior deben ser analizados y considerados dentro del estudio que se pretende realizar. Para ello, es necesario realizar una revisión amplia de la literatura existente con respecto a estos aspectos, de manera de garantizar tanto la comprensión del fenómeno como las variables que deben ser consideradas al momento de generar hipótesis del comportamiento de la entrada de la dilución.

De la misma manera, es necesario realizar una revisión crítica de los modelos y aproximaciones predictivas del comportamiento de la dilución existentes hoy en día. Puesto que resulta importante tanto para sentar una base del estado del arte entorno a la materia como para justificar la existencia de un nuevo estudio que considere variables y condiciones que aún no han sido tomadas en cuenta.

Finalmente, se deben revisar y analizar los fundamentos conceptuales y matemáticos de la herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional, REBOP, de manera de formular una metodología tanto para su comparación con los datos de mina como para su utilización en la prueba de la hipótesis final.

Así, se presenta a continuación una revisión que va desde la teoría de flujo gravitacional y las consideraciones actuales de modelos de flujo, los modelos y aproximaciones del comportamiento de la dilución existentes en la actualidad, hasta la formulación fundamental de REBOP y los trabajos de validación y calibración llevados a cabo a la fecha.

### 2.2 TEORÍA DE FLUJO GRAVITACIONAL

El flujo gravitacional es el concepto del movimiento de un grupo de partículas que interactúan entre sí, y cuyas trayectorias son gobernadas tanto por la gravedad como por las fuerzas causadas por su interacción (Castro, 2006). El estudio del fenómeno de flujo gravitacional de los fragmentos de roca que se mueven dentro de la zona de extracción en una mina resulta de gran interés, puesto que la forma de este movimiento

impacta tanto en la recuperación del mineral como en la entrada de dilución de las minas que extraen el mineral a través de métodos de hundimiento.

Así, desde la operación de las primeras minas de Block Caving en el mundo, se estudia el fenómeno de flujo gravitacional, desarrollándose desde entonces (1916) modelos físicos utilizando arena, grava y roca fragmentada en pruebas de laboratorio, pruebas a escala mina utilizando marcadores naturales (materiales como maderas y aceros provenientes de niveles superiores) y modelos matemáticos basados en predicción estocástica y en el análisis de ecuaciones de balance de masa y esfuerzos.

### **2.2.1 Elipsoides de extracción y movimiento**

Dentro de los investigadores que desarrollaron modelos físicos, destacan los estudios de Kvapil (1965), quien resulta ser el primero en obtener una representación matemática del fenómeno del flujo. A través de experimentos con arena a escala de laboratorio, introduce los primeros conceptos fundamentales dentro de la teoría de flujo gravitacional. Tales conceptos corresponden a la evidencia de 2 zonas espaciales definidas dentro de sus pruebas con arena, la primera, llamada “elipsoide de extracción” corresponde al volumen definido por la ubicación original de todos los puntos que resultaran extraídos en el punto de extracción y la segunda, llamada “elipsoide de movimiento” corresponde al volumen definido por la interfaz entre los puntos que han cambiado de posición con respecto a la que tenían iniciada la extracción y aquellos cuya posición permanece invariable desde que la extracción se inicia (Figura 1). Más tarde (Kvapil, 1992), establece relaciones geométricas entre ambas zonas, determinando que la relación de alturas entre el elipsoide de extracción y movimiento es de 1:2.5 y la relación entre los volúmenes es 1:15.

Otro tipo de modelos físicos se han desarrollado a raíz de la inquietud por la existencia de modelos sólo con arena. De esta manera, varios investigadores han llevado a cabo experimentos con grava, de manera de representar mejor el fenómeno ocurrido en las minas que con arena. En este contexto, destaca Power (2004), quien afirma que alcanzando una escala de 1:30 es posible obtener resultados en los modelos parecidos a lo que ocurre en una mina.

Últimamente y en el marco del “International Caving Study” se desarrolló un modelo físico tridimensional con gravilla, obteniéndose como conclusión principal que las zonas de extracción crecerán de manera indefinida a medida que se extrae material y que en tiraje aislado, la masa extraída y la altura del material serán las principales influencias en las zonas de extracción (Castro et al., 2007).

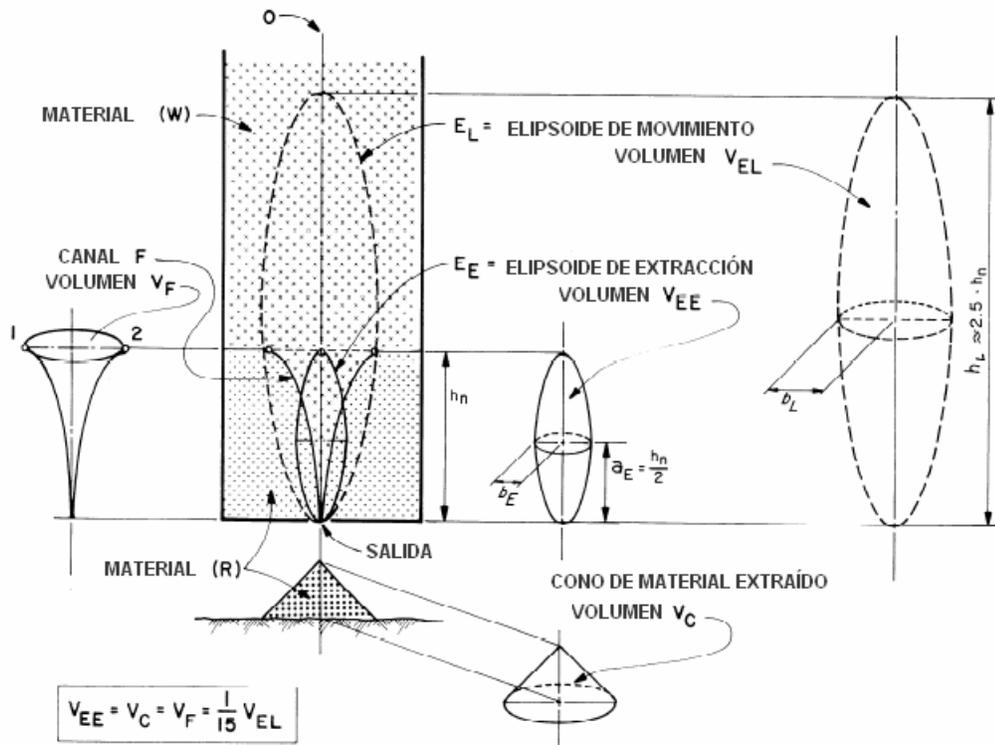


FIGURA 1: RELACIONES GEOMÉTRICAS ELIPSOIDES DE EXTRACCIÓN Y MOVIMIENTO (KVAPIL, 1992)

## 2.2.2 Modelos de flujo

Actualmente se postula que existen 3 mecanismos de extracción en el flujo gravitacional del material fragmentado en las minas de block/panel caving, estos son denominados flujo en masa (*mass flow*), flujo granular (*granular flow*) y difusión de vacíos (*void diffusion*).

### a. Flujo en masa (*mass flow*)

El concepto de flujo en masa se ilustra en las Figuras 2 y 3. El mecanismo de flujo en masa ocurre en la parte superior de un hundimiento ya establecido donde la subsidencia es uniforme. Las partículas que componen el flujo tienen trayectorias verticales, no existe mezcla vertical ni horizontal, y la tasa de flujo es la misma tanto para el material grueso como para el fino (Laubscher 2000).

### b. Flujo granular (*granular flow*)

Si se extrae al mismo tiempo de un gran número de puntos de extracción, se producirá una zona de flujo en masa en la parte superior de las columnas de extracción, mientras que en la parte inferior existe una zona de interacción de esfuerzos que induce movimiento lateral del material desde zonas menos activas hacia aquellas zonas con mayor actividad de las partículas que componen el flujo. Este movimiento ayuda a equiparar la tasa de subsidencia en la zona de flujo en masa superior. Este mecanismo también recibe el nombre de flujo interactivo (Laubscher, 2000).

### c. **Difusión de vacíos (void diffusion)**

Si, por lo menos en las primeras etapas de la propagación del caving, el material quebrado se compone de fragmentos grandes y angulosos, como suele ocurrir en las operaciones de block y panel caving, no se desarrollará un elipsoide de movimiento clásico. En su lugar, existirá un patrón de flujo irregular en forma de “dedos” como se ilustra en la Figura 3. Este mecanismo de difusión de vacíos fue postulado en 1968 por Jolley para sublevel caving y consiste en la generación de vacíos debido al tamaño y angulosidad de los fragmentos quebrados que pueden ser llenados con material más fino proveniente de un área superior o de los costados. Los experimentos de marcadores de Gustafsson (1998) en operaciones de sublevel caving en Suecia confirman la difusión de vacíos.

Laubscher (2000) postula que este mecanismo opera de manera similar en block y panel caving, e identifica un comportamiento para tiraje aislado y otro para tiraje múltiple.

- Tiraje aislado (Figura 3a):  
La interacción de vacíos formará una chimenea que permitirá la migración del material fino superior (que podría ser material diluyente) hacia el seno del mineral, adelantando la entrada de dilución en el punto de extracción.
- Tiraje interactivo (Figura 3b):  
La coexistencia de muchos vacíos desestabilizará la propagación de un pasadizo único, lo cual limitará el flujo de material más fino proveniente de un área superior y generará flujo en masa, retrasando así la entrada del material diluyente.

Los modelos físicos y numéricos llevados a cabo en el marco del ICS (International Caving Study) no han sido capaces de replicar este mecanismo (Chitombo, 2005).

En general, si el material quebrado se compone de fragmentos redondeados y con una distribución granulométrica homogénea, el comportamiento de su flujo gravitacional será más parecido al modelo de flujo granular. Por otro lado, si el material quebrado posee un rango amplio de tamaños y una alta proporción de fragmentos de gran tamaño y angulosos, su comportamiento será el que dicta el mecanismo de difusión de vacíos (Laubscher, 2000).

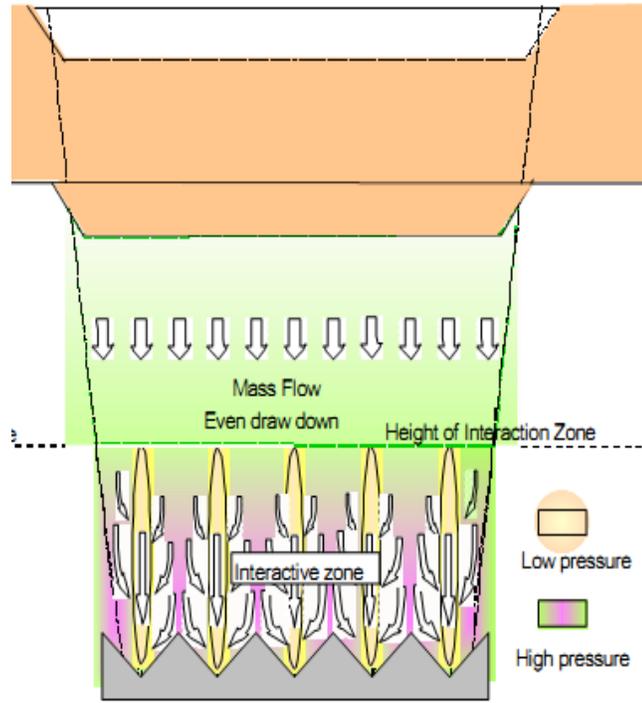


FIGURA 2: EXTRACCIÓN DE MÚLTIPLES PUNTOS, ZONA INTERACTIVA Y DE FLUJO EN MASA (LAUBSCHER, 2000)

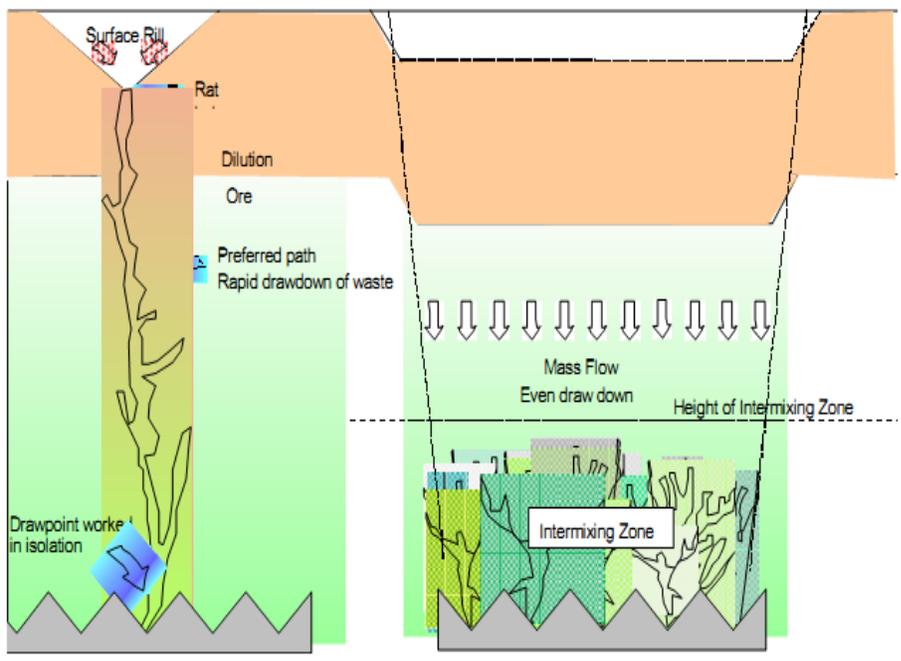


FIGURA 3: MECANISMO DE DIFUSIÓN DE VACÍOS, ZONA DE MEZCLA INTERMEDIA Y DE FLUJO EN MASA (LAUBSCHER, 2000)

## 2.3 TEORÍA DE COMPORTAMIENTO DE LA DILUCIÓN

En la literatura no existe una definición formal de dilución, sin embargo, es posible afirmar que lo que sea considerado dilución varía en cada operación. Desde el punto de vista económico, la dilución es aquel material que se extrae junto con el mineral cuyo valor no paga por sí solo sus costos de extracción. Por otra parte, existen operaciones donde el material proveniente de sectores previamente explotados es considerado dilución, a pesar de que su contenido de metal de interés sea mayor que el del material considerado mineral.

Como se menciona anteriormente, la dilución es una parte integral de una operación minera de hundimiento, y el objetivo de la operación es controlarla, ya sea minimizando el contenido total o aceptando su entrada hasta cierto punto en función de maximizar la recuperación de mineral. Para ello, la comprensión de su comportamiento bajo distintas condiciones in-situ y de operación es esencial.

Actualmente existen algunos estudios enfocados al comportamiento y control de esta variable en las operaciones de hundimiento que van desde la definición teórica de los parámetros que la afectan hasta modelos de comportamiento con variables acotadas y proyecciones de su aparición que establecen ciertas reglas básicas enfocadas al diseño minero y control de tiraje. Sin embargo, estos modelos no consideran en su construcción ciertas variables esenciales en la entrada y comportamiento del material diluyente en un punto de extracción, tales como la propagación del caving.

### 2.3.1 Medidas de la dilución

Existen dos formas de medir la dilución extraída en una operación minera. La primera medida se realiza con respecto a la cantidad de mineral extraído, de la siguiente forma:

$$Dilución(\%) = \frac{\text{material diluyente extraído [ton]}}{\text{mineral extraído [ton]}} \cdot 100$$

ECUACIÓN 1: MEDIDA DE LA DILUCIÓN

La segunda medida se conoce como dilución metalúrgica u observada, y se realiza con respecto a la cantidad de material total extraído, de la siguiente forma:

$$Dilución(\%) = \frac{\text{material diluyente extraído [ton]}}{\text{mineral extraído [ton] + material diluyente extraído [ton]}} \cdot 100$$

ECUACIÓN 2: MEDIDA DE LA DILUCIÓN METALÚRGICA U OBSERVADA

La estimación del material diluyente extraído puede hacerse en la operación a través de observaciones en los puntos de extracción y consolidarse con balances metalúrgicos en las plantas de tratamiento.

### 2.3.2 Parámetros que influyen en el contenido de dilución extraído

La dilución puede provenir de la pared colgante del cuerpo mineralizado y de los costados, ya sea desde sectores previamente explotados o desde roca estéril quebrada.

La zona de dilución debe ser analizada de la misma manera que la roca mineralizada y definida en términos de fragmentación y distribución de leyes (Laubscher, 2000). Los parámetros que afectan su entrada, y el contenido total de dilución extraído, en una explotación varían desde aquellos relativos a la geometría, geología y geomecánica hasta el diseño minero y la planificación. A continuación se detallan los principales parámetros que afectan esta variable según Laubscher (2006).

- Razón volumen de mineral y área de contacto mineral-diluyente:  
Mientras mayor sea la razón entre el volumen de mineral y el área de contacto mineral-diluyente, menor será el contenido total de dilución extraído (Laubscher, 2006). En la Figura 4 se aprecia que en la forma de la izquierda un mayor porcentaje del mineral queda expuesto a la entrada de la dilución comparada con la de la derecha, mientras que la razón entre el volumen de mineral y el área de contacto del mineral y el material diluyente es menor para la primera.
- Disposición y forma de la interfaz mineral-diluyente:  
Mientras más irregular e inclinada sea la interfaz, mayor será el contenido de dilución en la mezcla extraída comparado con el caso de una interfaz lateral vertical y de geometría regular.
- Diferencia entre la fragmentación del mineral y el material diluyente:  
Mientras más fina sea la fragmentación del material diluyente, relativa a la del mineral, mayor será el contenido de dilución en la mezcla y más temprana será la entrada del material diluyente al punto de extracción.
- Distribución de leyes en el material diluyente:  
De existir bolsones de altas leyes en el material diluyente, un muestreo errado podría conducir a sobre extracción de las columnas, trayendo consigo mayor entrada de material diluyente a los puntos.
- Interacción de los elipsoides de extracción y dirección del flujo:  
Mientras mayor sea la interacción entre los elipsoides de extracción, menor será el contenido de dilución que se extraiga de los puntos y más tardía será la entrada del material diluyente en ellos. Y mientras mayor sea el espaciamiento entre los elipsoides (y, por lo tanto, entre los puntos de extracción), mayor será la probabilidad de extraer un alto contenido de material diluyente a menos que se lleve a cabo un control de tiraje estricto.
- Diferencias entre densidades de mineral y material diluyente:  
Mientras mayor sea la densidad del mineral en comparación con la del material diluyente, menor será el contenido de dilución extraído y viceversa.
- Variante de hundimiento por bloques (block caving) o paneles (panel caving):  
Si la extracción se realiza a través de block caving en forma de pequeños bloques, la dilución lateral será mucho mayor que en una estrategia de panel caving con un ángulo de extracción definido, tal como se aprecia en la Figura 5.

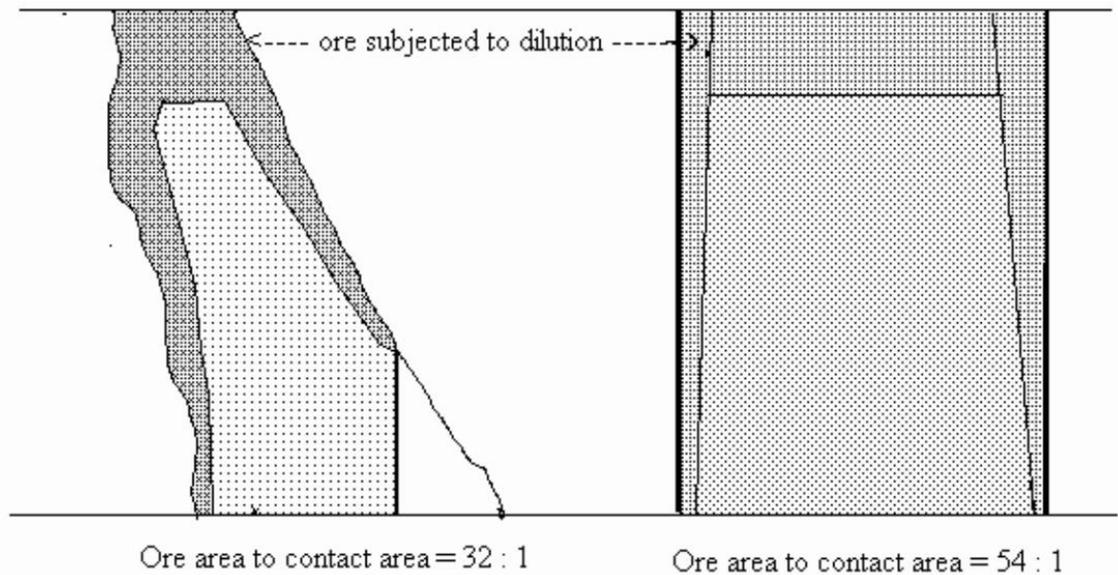


FIGURA 4: RAZÓN VOLUMEN MINERAL Y ÁREA DE CONTACTO MINERAL-DILUYENTE (LAUBSCHER, 2000)

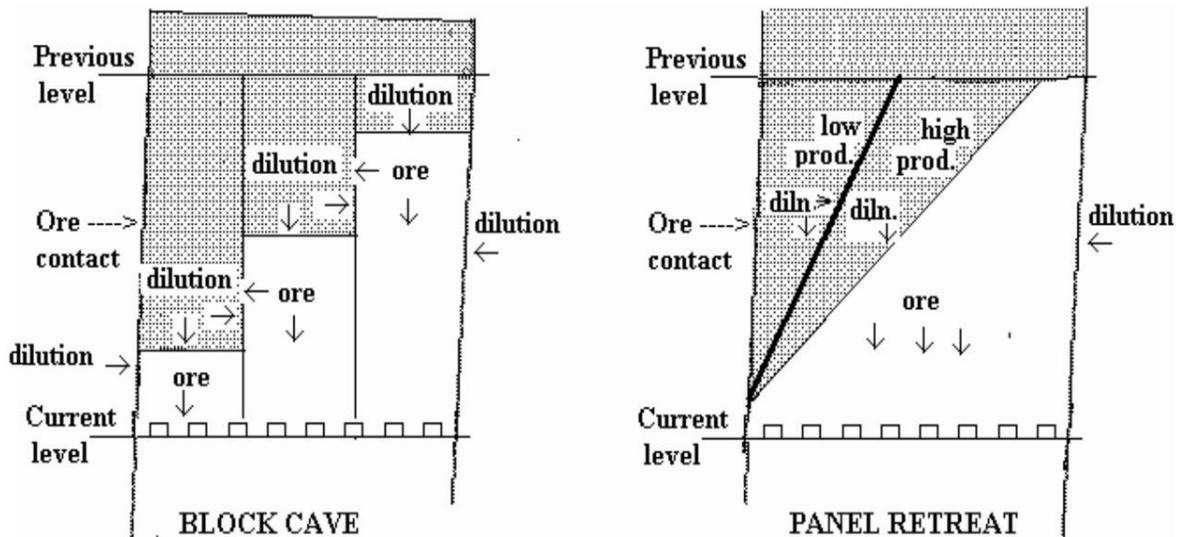


FIGURA 5: ENTRADA LATERAL DE DILUCIÓN EN BLOCK Y PANEL CAVING (LAUBSCHER, 2000)

### 2.3.3 Entrada de la dilución

Un indicador fundamental en el estudio de la dilución es cuándo ésta entra en los puntos de extracción. De esta manera, Laubscher (1994) define el porcentaje de entrada de dilución para un punto de extracción como el porcentaje de la columna que se ha extraído cuando ocurre la primera aparición de dilución en éste. Además (Laubscher, 2000), establece que el porcentaje de entrada de la dilución es una función de la cantidad de mezcla que ocurre en la columna, y que, a su vez, la mezcla es una función de:

- Altura de columna.

- Rangos de fragmentación.
- Espaciamiento entre puntos de extracción.
- Diferencia en tonelaje extraído de los distintos puntos de extracción activos.
- Altura de interacción (determinada por el espaciamiento entre puntos de extracción, diferencia en tonelaje extraído de ellos y los rangos de fragmentación del mineral y el material diluyente).

Por otra parte, DeWolfe (1981) advierte que es esencial para el control de la entrada de dilución realizar una extracción que permita que el espacio vacío que se genera entre la pila de material fragmentado y la zona de fractura sea propicio para la propagación de la fragmentación de material in-situ sin que el volumen permita el escurrimiento de material diluyente previamente quebrado. Este fenómeno se conoce como “rilling” y se describe gráficamente en la Figura 6.

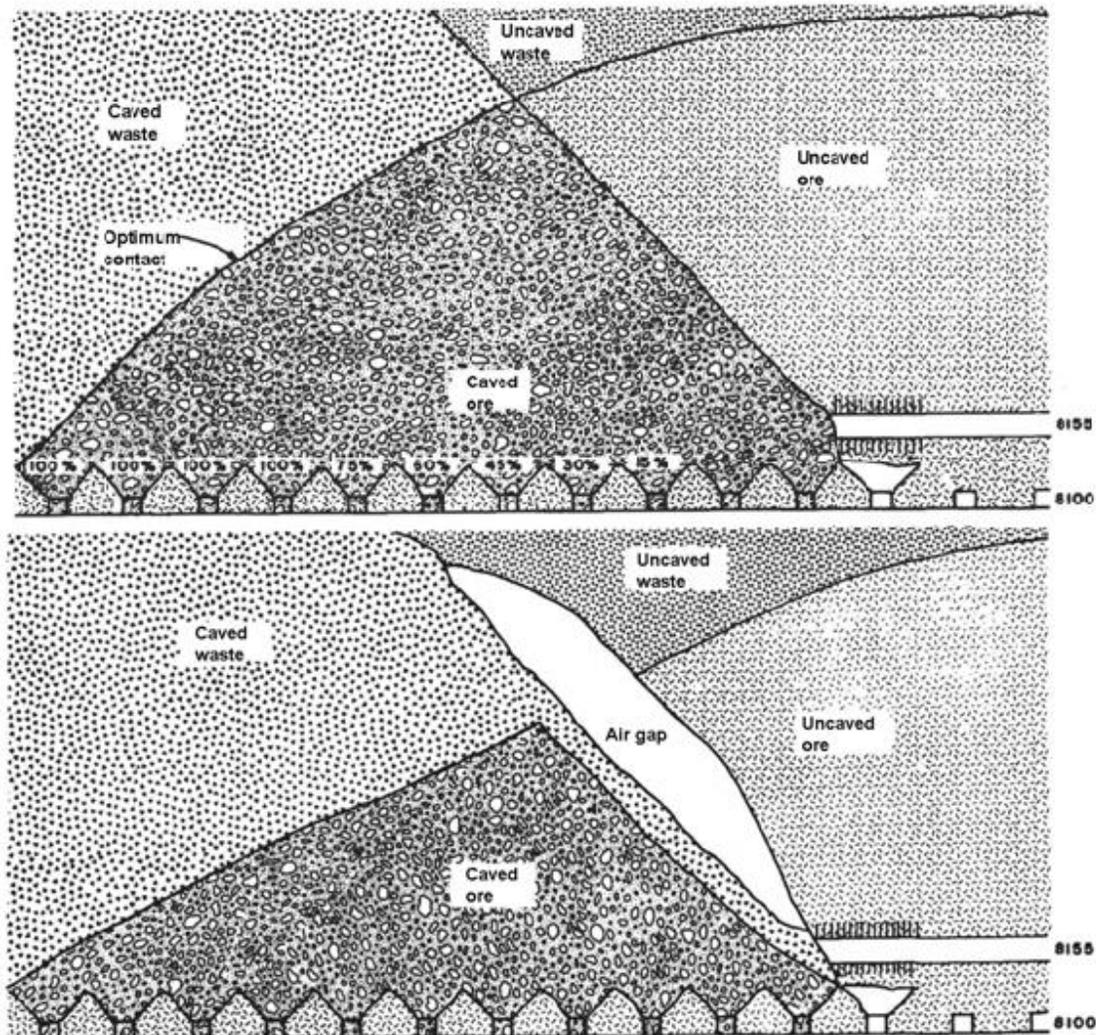


FIGURA 6: FENÓMENO DE RILLING (DEWOLFE, 1981)

## 2.4 MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE LA DILUCIÓN

En la actualidad no existen muchos modelos de predicción de la entrada y comportamiento posterior de la dilución, sin embargo, existen dos autores que proponen aproximaciones del comportamiento de esta variable basados en algunos de los parámetros anteriormente mencionados. Por un lado, Laubscher (1994) introduce una metodología de estimación del punto de entrada de la dilución (posteriormente refinada en el 2000), que se basa en la estimación de la altura de interacción (HIZ), el esponjamiento que tendrá la columna al momento de ser extraída (medida a través del factor de esponjamiento, S) y la manera en que se realice la extracción del punto con respecto a sus vecinos. A pesar de que esta metodología se basa en curvas empíricas y reglas de dedo, la existencia de modelos numéricos que predigan la entrada de dilución no ha podido desplazarla debido a que, por una parte, los modelos basados en la metodología de Laubscher representan herramientas flexibles, rápidas y poseen resultados trazables de mezcla. Por otra parte, el hecho de que los modelos numéricos no hayan sido validados con datos de varias minas, restringe aún más su utilización en las operaciones. Por su parte, Susaeta (2004) propone un modelo de flujo gravitacional que caracteriza el comportamiento de la dilución según sea el tipo de flujo en interactivo, interactivo-aislado y aislado, estableciendo que la entrada de dilución será más temprana mientras más aislado sea el flujo. Además, establece que existe una relación entre la uniformidad con que se extrae tonelaje de un punto con respecto a sus vecinos y el tipo de flujo que ocurra en su columna, y crea un índice para cuantificar esta uniformidad.

### 2.4.1 Modelo de Laubscher (Laubscher 1994, 2000)

En torno al comportamiento que tendrá la dilución en una operación de hundimiento, Laubscher, a través de diversos trabajos y basado en observaciones empíricas, propone dos modelos importantes y reconocidos en el campo de la minería de hundimiento masivo. El primero consiste en una estimación del punto de entrada de la dilución en un punto de extracción (PED) a partir de la estimación de la altura de interacción (HIZ), el esponjamiento que alcance el material en la columna de extracción (S) y la desviación estándar de los tonelajes extraídos del punto con respecto a sus vecinos. El segundo, corresponde a un modelo volumétrico de mezcla basado en observaciones empíricas y que considera como dato de entrada el PED. Estos modelos son ampliamente usados en la industria en etapas que van desde el diseño hasta la planificación de minas de block/panel caving.

Como se menciona, el cálculo del punto de entrada de la dilución propuesto por Laubscher (1994, 2000), considera que éste será una función de:

- La altura de columna del punto de extracción (Hc):  
La cual corresponde a la altura medida desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/material diluyente.
- El esponjamiento alcanzado en la columna:  
El cual corresponde al aumento relativo de volumen que experimenta la roca debido a su fragmentación. Es medido a través del factor de esponjamiento (S).

Laubscher (1994), propone que los factores de esponjamiento típicos según tipo de fragmentación esperada de la roca son 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.

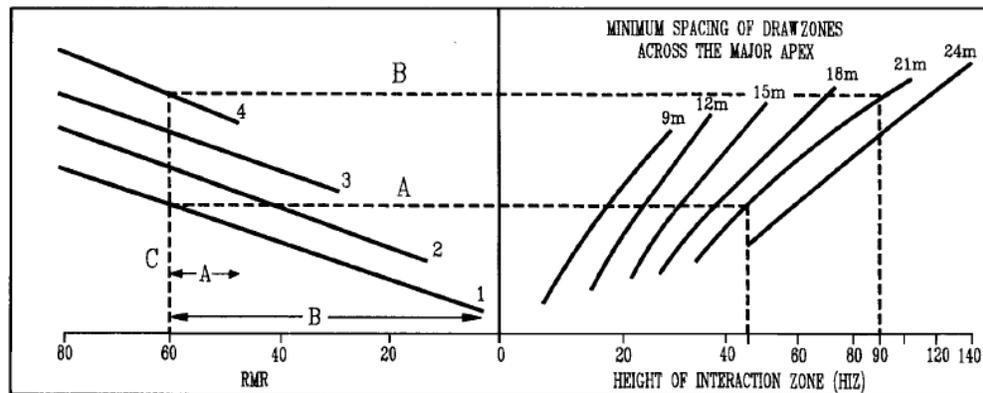
- La altura de interacción (HIZ):

Corresponde a la altura desde la cual se producirá interacción entre los elipsoides de extracción. El autor afirma que ésta será función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el RMR del material diluyente y el mineral, y el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor. La Figura 7 ilustra las curvas empíricas propuestas por Laubscher (1994) y un ejemplo de cálculo.

- La diferencia de extracción entre el punto y sus vecinos:

Se refiere a la diferencia entre los tonelajes extraídos de un punto de extracción con respecto a sus vecinos en un determinado período de tiempo. El autor (1994), propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje (DCF) cuyo cálculo se basa en la desviación estándar de los tonelajes extraídos entre un punto y sus vecinos a una escala de extracción mensual. La Figura 8 ilustra el gráfico propuesto por Laubscher (1994) para el cálculo del DCF y un ejemplo de cálculo.

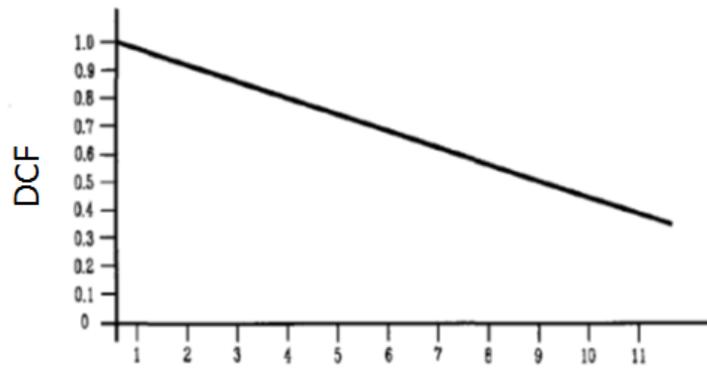
RMR OF ALL MATERIAL IN THE POTENTIAL DRAW COLUMN TO BE USED IN CALCULATION AS FINES FLOW MUCH FURTHER THAN COARSE



| RMR Range | Curves | Examples | Ratings | Range | D.Z. Spacing | H.I.Z |
|-----------|--------|----------|---------|-------|--------------|-------|
| 0 - 14    | NO.1   | A        | 50 - 60 | 10    | 21m          | 45m   |
| 15 - 29   | NO.2   |          |         |       |              |       |
| 30 - 49   | No.3   |          |         |       |              |       |
| +50       | No.4   | B        | 5 - 60  | 55    | 21m          | 90m   |

VERTICAL LINE "C" LOCATED AT HIGHEST RATING OF MATERIAL IN DRAW COLUMN

FIGURA 7: ALTURA DE INTERACCIÓN (HIZ) (LAUBSCHER, 1994)



Standard Deviation x 100 of Tonnage of Working Drawpoints

| D/Ps   | W/1  | E/1 | W/2  | E/2  | W/3 | E/3  | W/4 | E/4  |
|--|------|-----|------|------|-----|------|-----|------|
| Monthly Tonnage                              | 2000 | 800 | 1000 | 2500 | 600 | 1500 | 800 | 1800 |
| Mean = 1375 Standard Deviation = 682/100 = 7 |      |     |      |      |     |      |     |      |

Draw Control Factor = 0.6

FIGURA 8: FACTOR DE CONTROL DE TIRAJE (DCF) (LAUBSCHER, 1994)

De esta manera, Laubscher (1994), propone una relación para el cálculo del PED.

$$PED (\%) = \frac{H_C \cdot S - HIZ}{H_C \cdot S} \cdot DCF \cdot 100$$

ECUACIÓN 3: PUNTO DE ENTRADA DE LA DILUCIÓN (PED) (LAUBSCHER, 1994)

El cálculo del PED introducido por Laubscher resulta una aproximación determinista basada en reglas empíricas que no considera aspectos relevantes como la forma de la fuente de material diluyente y su ubicación espacial, ni la estrategia global de apertura de puntos que tendrá la explotación. Así, asume que bajo ciertas condiciones de calidades de roca, alturas de columna, geometría del nivel de producción y control de tiraje un punto de extracción tendrá el mismo punto de entrada de la dilución independiente de la dirección de avance de la extracción y la potencial dilución lateral que pudiera afectarlo.

Una vez definido el punto de entrada de la dilución para un punto, Laubscher (1994), propone un modelo volumétrico de mezcla basado en la división de la columna de extracción en tajadas que poseen un volumen, densidad y leyes iniciales determinados. Luego, a partir de una altura en la columna definida por el PED, traza una recta hasta la altura máxima de la columna, lo que define una interfaz diagonal entre el material diluyente y el mineral. Así, divide hacia abajo la columna con diagonales que definen la mezcla que tendrán las nuevas tajadas a medida que se vaya realizando la extracción. La figura 9 ilustra el procedimiento.



- El espaciamiento de los puntos de extracción es inversamente proporcional a la recuperación de mineral.
- La altura de columna es inversamente proporcional a la dilución total extraída.
- La fragmentación del material en la columna de extracción aumenta con la extracción.
- Existirá interacción si dos puntos poseen un espaciamiento menor a 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado.

Destacan para el interés en el estudio de la dilución las premisas que afirman que el tiraje uniforme es una condición necesaria para postergar el punto de entrada de la dilución y que la altura de columna es inversamente proporcional a la dilución total extraída.

Considerando lo anterior, Susaeta (2004), plantea que el flujo gravitacional, desde la perspectiva de movimiento masivo, puede modelarse de la siguiente manera:

$$Fm = f(E, PM, Gm)$$

ECUACIÓN 4: MODELO DE FLUJO SUSAETA (2004)

Donde:

- Fm: Comportamiento de flujo masivo.
- E: Parámetros de caracterización de la extracción.
- PM: Propiedades del material fragmentado.
- Gm: Parámetros referentes a la geometría de los puntos de extracción.

Es decir, que el comportamiento del flujo de material sobre un punto de extracción es una función de los parámetros de extracción, las propiedades del material fragmentado y la geometría de los puntos de extracción.

De los resultados de experimentos realizados en arena (Susaeta, 2004) se observa que pueden establecerse 2 velocidades de flujo gravitacional. La primera es aquella que tienen las partículas dentro del elipsoide de flujo aislado y Susaeta la denomina “velocidad de tiraje aislado” ( $V_{TA}$ ). La segunda, denominada “velocidad de tiraje interactivo” ( $V_{TI}$ ), corresponde a aquella que tendrán las partículas que viajan fuera de la zona de baja densidad que forma el elipsoide de flujo aislado. La Figura 10 ilustra las velocidades observadas en los experimentos de arena realizados por Susaeta.

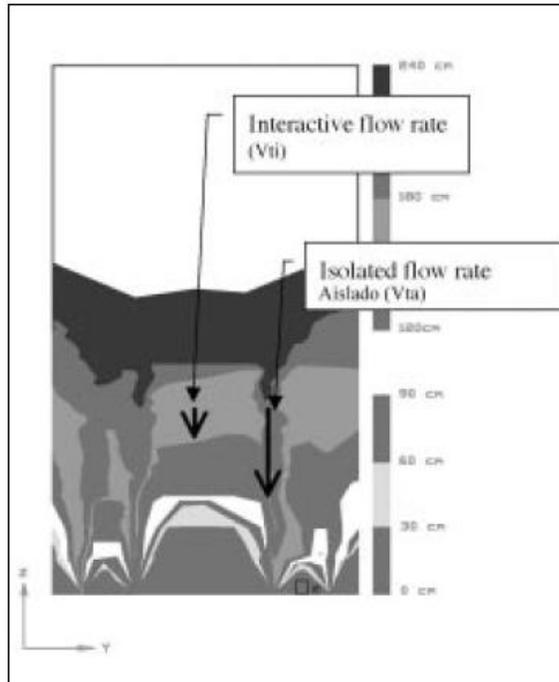


FIGURA 10: VELOCIDADES DE TIRAJE EXPERIMENTOS DE ARENA (SUSAETA, 2004)

Así, Susaeta (2004), afirma que el comportamiento del flujo puede clasificarse en tres condiciones que quedan definidas por la diferencia entre la  $V_{TI}$  y la  $V_{TA}$ , éstas son:

- Tiraje Aislado:  
Condición de flujo donde  $V_{TA}$  es mayor que cero y  $V_{TI}$  es igual a cero.
- Tiraje Aislado-Interactivo:  
Condición de flujo donde  $V_{TA}$  es mayor que  $V_{TI}$  (ambas mayores que cero).
- Tiraje Interactivo:  
Condición de flujo donde  $V_{TA}$  es igual a  $V_{TI}$  (ambas mayores que cero).

| Model of Behavior                | Relation of Flow Rate (Velocity) |
|----------------------------------|----------------------------------|
| a) <i>Isolated Flow</i>          | $v_{ti}=0$                       |
| b) <i>Isolated - Interactive</i> | $v_{ta} > v_{ti} > 0$            |
| c) <i>Interactive Flow</i>       | $v_{ta} = v_{ti}$                |

FIGURA 11: COMPORTAMIENTO DE FLUJO SEGÚN DIFERENCIA DE VELOCIDADES (SUSAETA, 2004)

De manera de caracterizar los comportamientos de flujo con un solo índice, Susaeta (2004), define el “grado de interacción” (G.I.) como la razón entre  $V_{TI}$  y  $V_{TA}$ . De esta manera, el comportamiento del flujo queda caracterizado en función del G.I. como:

- Tiraje Aislado: G.I. = 0.
- Tiraje Aislado-Interactivo:  $1 > G.I. > 0$ .
- Tiraje Interactivo: G.I. = 1.

De esta forma, siguiendo las premisas de construcción del modelo, Susaeta (2004) plantea que a medida que el comportamiento del flujo sea más interactivo, la dilución observada en el punto de extracción será menor. Además, postula que cuando el flujo se comporte como Tiraje Aislado-Interactivo y Tiraje Interactivo, la dilución que se observe al principio de la extracción del punto corresponderá a dilución lateral y luego comenzará el ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción. Mientras que para el caso de Tiraje Aislado, la primera observación de dilución en el punto corresponderá al ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción y el contenido de dilución observado en el punto aumentará a medida que se siga realizando la extracción de forma más agresiva que para los otros casos. La Figura 12 ilustra el comportamiento de la dilución observada en el punto de extracción para los comportamientos de flujo planteados por Susaeta (2004).

La transición de un modelo a otro puede controlarse a través de los parámetros de extracción (Susaeta, 2004). Lo cual implica que el comportamiento de la dilución en el punto de extracción puede ser controlado a través de éstos parámetros. Esta afirmación es clave en el modelo de Susaeta puesto que indica que mientras más pareja sea la extracción de un punto con respecto a sus vecinos, más cercano será el flujo del material quebrado a una condición de Tiraje Interactivo y, por lo tanto, menor será la dilución extraída y mayor será la recuperación de mineral.

En función de lo anterior, Susaeta (2004), define el “índice de uniformidad” y posteriormente el “porcentaje de uniformidad” como una métrica que caracteriza la forma en que se realiza la extracción sobre un punto con respecto a sus vecinos.

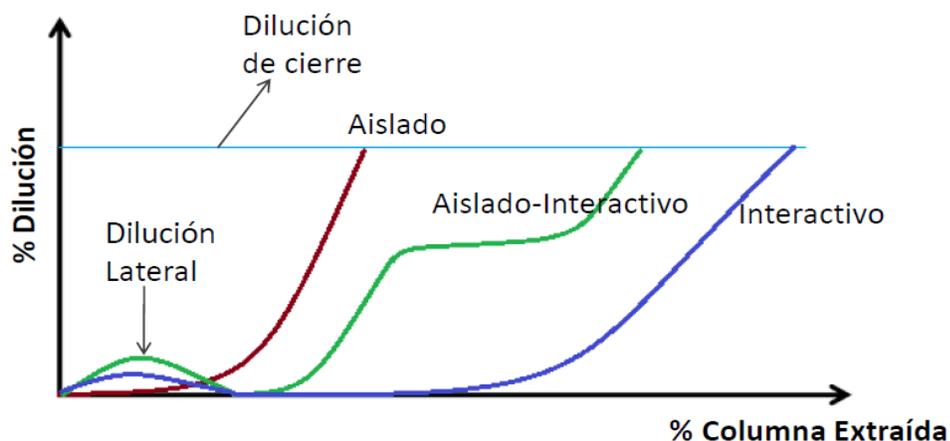


FIGURA 12: COMPORTAMIENTO DE DILUCIÓN SEGÚN MODELO DE FLUJO, ADAPTADO DE SUSAETA (2004)

El índice de uniformidad (I.U.) introducido por Susaeta (2004) corresponde a un vector de 2 dimensiones y se define de la siguiente manera:

$$I.U. = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{max} - t_i)$$

ECUACIÓN 5: ÍNDICE DE UNIFORMIDAD, SUSAETA (2004)

Donde:

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

La primera dimensión ( $\Delta$ ) corresponde al número de vecinos inactivos del punto, mientras que la segunda se denomina “Índice de uniformidad específico”.

Para determinar en qué condición de tiraje se encuentra un punto con un determinado índice de uniformidad en un determinado período de tiempo, Susaeta (2004) utiliza la matriz que se ilustra en la Figura 13.

|  |   | Índice de Uniformidad Específico |           |           |           |         |
|--|---|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
|  |   | 0 - 0,2                          | 0,2 - 0,4 | 0,4 - 0,6 | 0,6 - 0,8 | 0,8 - 1 |
| Número de puntos inactivos en vecindad | 0 | UNIF                             | UNIF      | UNIF      | SEMI      | SEMI    |
|  | 1 | UNIF                             | UNIF      | SEMI      | SEMI      | SEMI    |
|  | 2 | UNIF                             | SEMI      | SEMI      | SEMI      | AISLADO |
|  | 3 | SEMI                             | SEMI      | SEMI      | AISLADO   | AISLADO |
|  | 4 | SEMI                             | SEMI      | AISLADO   | AISLADO   | AISLADO |
|  | 5 | AISLADO                          | AISLADO   | AISLADO   | AISLADO   | AISLADO |
|  | 6 | AISLADO                          | AISLADO   | AISLADO   | AISLADO   | AISLADO |

FIGURA 13: MATRIZ DE UNIFORMIDAD, ADAPTADO DE SUSAETA (2004)

A partir de esta definición, Susaeta (2004), introduce el “porcentaje de uniformidad” definiéndolo como el porcentaje de tiempo (o de toneladas extraídas) durante el cual un punto se encuentra extrayendo en condición uniforme. Tal ejercicio puede usarse equivalentemente para definir el “porcentaje de semi-uniformidad” y el “porcentaje de desuniformidad” (aislado).

De manera de comprobar que es posible la transición de un tipo de comportamiento de flujo a otro a través de los parámetros que controlan la extracción se realiza (Susaeta, 2004) un respaldo del análisis, en primer lugar, a través del estudio del grado de interacción en El Teniente y luego con el cálculo del punto de entrada de dilución para sectores del El Salvador y El Teniente, además se estudia el comportamiento de la dilución del sector parrilla de Andina.

El grado de interacción es calculado utilizando sondajes a través del ápex mayor en El Teniente y se obtiene una relación entre éste y el I.U. (Susaeta, 2004). La Figura 14 muestra la relación obtenida entre el G.I. y el I.U. (porcentaje de desuniformidad), la cual indica que mientras menor es la uniformidad, menor es el grado de interacción (más aislado es el flujo).

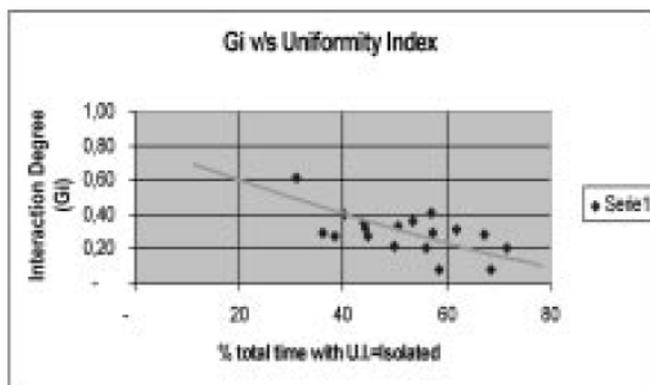


FIGURA 14: RELACIÓN ENTRE G.I. E I.U. (SUSAETA, 2004)

El punto de entrada de dilución para distintos sectores del El Salvador y El Teniente tiene una dependencia directa con el I.U. para aquellos puntos que poseen un porcentaje de uniformidad superior al 70% (Susaeta, 2004). La Figura 15 ilustra los resultados del análisis del punto de entrada de dilución y el I.U. para los distintos sectores.

| Sector            | Uniformity Index |                       | % Dilution Entry |
|-------------------|------------------|-----------------------|------------------|
|                   | %t = Isolation   | % t = Unif. + semiuni |                  |
| Inca Norte        | 34               | 66                    | 57               |
| Inca Central      | 57               | 43                    | 41               |
| Quebrada Teniente | 19               | 81                    | 62               |
| Teniente 4        | 34               | 66                    | 54               |

FIGURA 15: RELACIÓN ENTRE I.U. Y PED (SUSAETA, 2004)

Finalmente, Susaeta (2004) encuentra una relación entre el Pedza (punto de entrada de la dilución en flujo aislado) y el índice de uniformidad, confirmando la hipótesis del retraso del punto de entrada de la dilución con el aumento del porcentaje de uniformidad. La Figura 16 ilustra la relación entre el Pedza y el I.U. para el sector A de las parrillas en Andina.

En 2008, Susaeta publica un trabajo de estudio de comportamiento de la dilución en minas de CODELCO-Chile basado en el modelo creado el 2004. En él, la principal conclusión es que la forma en que se realiza la extracción (uniformidad de tonelajes) posee un impacto determinante en el punto de entrada de dilución. Por lo tanto, a través del control de la uniformidad es posible retrasar el punto de entrada de dilución para un panel en explotación.

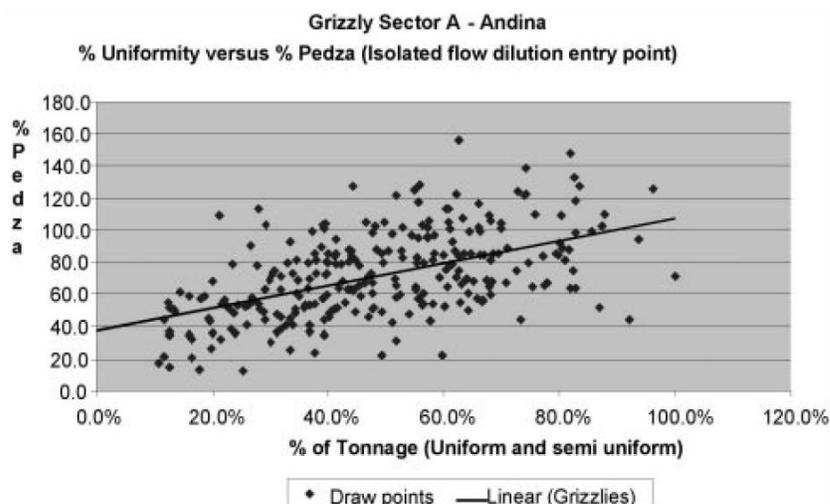


FIGURA 16: RELACIÓN ENTRE PEDZA E I.U., SECTOR A PARRILLAS ANDINA (SUSAETA, 2004)

## 2.5 CONTROL DE TIRAJE EN BLOCK/PANEL CAVING

Laubscher (2006) define el control de tiraje como la práctica de controlar las toneladas extraídas de puntos de extracción individuales, con el objetivo de:

- Minimizar la dilución total extraída y mantener la ley de envío a planta planificada.
- Asegurar la máxima recuperación con el contenido mínimo de dilución.
- Evitar concentraciones dañinas de esfuerzo en el área productiva.
- Evitar la generación de condiciones que pudieran conducir a estallidos de aire o barro.

La viabilidad del proyecto en su totalidad podría depender de la correcta determinación de las tasas de extracción. La tasa de extracción potencial debe ser calculada para las distintas etapas de la extracción desde el inicio del caving. Una vez que el caving haya madurado (haya conectado con la superficie o con un sector superior previamente

explotado) la tasa de extracción debe ser regularizada (Laubscher, 2006). Por lo tanto, tiene sentido separar el control de tiraje previo a la maduración del caving (etapa de iniciación) y posterior a ésta (etapa de producción o régimen).

### 2.5.1 Etapa de iniciación del caving

Según Brown (2007), los factores que afectan en mayor medida la iniciación del caving son:

- El punto de inicio de la socavación (undercut) y la dirección de avance de ésta.
- La forma del frente de avance de la socavación tanto en planta como en perfil.
- La naturaleza geomecánica del cuerpo mineralizado, los esfuerzos inducidos y la mecánica del caving asociada.
- El número de puntos activos requeridos para lograr la producción planificada.
- La estrategia de control de tiraje y el plan de producción
- La extensión futura del área hundida inicial, ya sea mediante block o panel caving.

Dentro de ellos, la influencia del control de tiraje es fundamental tanto en el inicio como en la propagación del caving. La clave de esta influencia se encuentra en la relación que existe entre la tasa de propagación natural del caving y la tasa de extracción del material quebrado. Resulta evidente pensar que la tasa de propagación del caving establece un límite para la tasa de extracción del material quebrado. Si se considera una sección de ancho  $w$  en un área que se encuentra en la etapa de iniciación del caving, tal como lo muestra la Figura 17a, se tendrá que habiendo extraído una distancia vertical equivalente  $d$  (Figura 17b) ocurrirá una propagación del caving hasta que el vacío sea llenado nuevamente (Figura 17c). Durante el proceso de quiebre, el material in-situ de volumen  $V$  aumentará su volumen a  $V(1+B)$ , donde  $B$  es el factor de aumento de volumen. Así, si se iguala el volumen extraído con el volumen quebrado, se tiene que  $d$  debe ser igual a  $cB$  (donde  $c$  es la altura de propagación del cave back producto de la extracción de  $d$ ). Por lo tanto, las tasas de propagación del cave back ( $\dot{c}_t$ ) y de extracción ( $\dot{d}_t$ ) deben cumplir la siguiente relación:

$$\dot{d}_t = \dot{c}_t \cdot \frac{B}{1+B}$$

ECUACIÓN 6: RELACIÓN ENTRE TASA DE EXTRACCIÓN Y PROPAGACIÓN DEL CAVE BACK (BROWN, 2007)

De acuerdo a lo anterior, para tener un control adecuado de la operación durante la etapa de iniciación del caving, resulta imprescindible llevar un control de la tasa de propagación del cave back, la cual es necesariamente diferente para cada operación minera de hundimiento debido a que cada una posee distintas condiciones tanto geomecánicas como de diseño y estrategia de apertura de puntos de extracción.

También resulta importante llevar un registro del avance la cavidad de manera de determinar cuándo se ha alcanzado la superficie o la conexión con material quebrado proveniente de un sector superior previamente explotado.

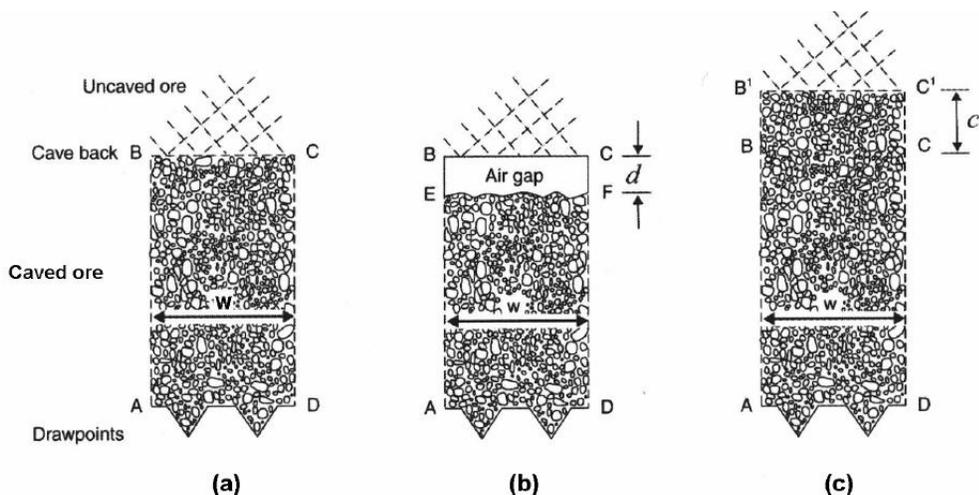


FIGURA 17: SECCIÓN VERTICAL A TRAVÉS DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN EN QUE SE MUESTRA A) PILA LLENA DE MATERIAL QUEBRADO, B) FORMACIÓN DE UN "AIR GAP" POR LA EXTRACCIÓN, Y C) LLENADO DEL VACÍO POR LA PROPAGACIÓN DEL CAVE BACK (BROWN, 2007)

### 2.5.2 Etapa de régimen

Una vez que se ha alcanzado la conexión con superficie o con un sector superior previamente explotado, se habla del comienzo de la etapa o estado de régimen de las columnas de extracción. Laubscher (2000), resume las estrategias de control de tiraje para esta etapa más comúnmente empleadas en las operaciones de block o panel caving de la siguiente manera:

- Tiraje uniforme:  
Se refiere a extraer las toneladas de mineral de la forma más uniformemente posible en un punto de extracción con respecto a sus vecinos, es decir, el objetivo es extraer la misma cantidad de toneladas de los puntos en una unidad de tiempo. Laubscher (2000), asegura que esta es generalmente la mejor manera de asegurar una alta recuperación y un buen control de la dilución, sin embargo, enfocarse en el control de las toneladas extraídas de cada punto sin considerar que no todos se encuentra a la misma distancia vertical del material diluyente no necesariamente asegurará que la dilución entre al final de la vida de los puntos.
- Tiraje proporcional a la altura de columna:  
Consiste en asignar un factor de escalamiento por la diferencia en alturas de las columnas de extracción, es decir, el objetivo es que las columnas de extracción vecinas se agoten al mismo tiempo. Esto, en teoría, permite que el material diluyente ingrese al mismo tiempo en los puntos de extracción. Laubscher (2000), añade que si existe mucha diferencia en las alturas de columna de extracción, esta estrategia obliga a realizar una extracción mucho más rápida de algunos puntos, lo que podría generar problemas en la planificación.

- Altas Leyes:  
Consiste en extraer antes o a una tasa más elevada aquellas columnas que posean las mejores leyes del metal de interés. Laubscher (2000), señala que esta estrategia conlleva a la extracción aislada de los puntos de extracción produciendo una entrada temprana de la dilución y contaminación de las columnas vecinas.
- Control de la interfaz inclinada de mineral-diluyente:  
El objetivo es controlar la interfaz inclinada que separa el mineral del material diluyente de manera de evitar la entrada temprana de la dilución tal como se ilustra en la Figura 6. Esto, generalmente se intenta hacer manteniendo una tasa de extracción inversamente proporcional a la distancia del punto de extracción a la interfaz inclinada.

Brown (2007), añade que es especialmente importante asegurarse de que se contará con la cantidad suficiente de puntos de extracción de manera de cumplir con el objetivo de la estrategia escogida sin comprometer la tasa productiva planificada de la operación de hundimiento.

### 2.5.3 Índices de uniformidad

En gran medida, las prácticas de control de tiraje durante la etapa de régimen se reducen a controlar la uniformidad con que se realiza la extracción. En este sentido, es importante realizar una revisión de los principales índices de medición de la uniformidad para operaciones de hundimiento. La Tabla 1 resume los principales índices de uniformidad creados para operaciones de block/panel caving.

TABLA 1: RESUMEN ÍNDICES DE UNIFORMIDAD

| Índice de Uniformidad                 | Formulación   | Autor                     | Parámetros  | Rango                             |               |
|---------------------------------------|---|---------------------------|---|-----------------------------------|---------------|
| Índice de uniformidad (vectorial)     | $I.U. = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{max} - t_i)$ | Susaeta 2004              | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ tonelajes puntuales, máximo y mínimo</li> <li>➤ n° de vecinos</li> <li>➤ n° de puntos inactivos</li> </ul> | Matriz de Uniformidad (Figura 13) |               |
| Draw Control Factor                   | Ábaco empírico (Figura 8)   | Laubscher 1994            | ➤ Desviación estándar de tonelajes acumulados   | 0.3                               | No Uniforme   |
|                                       |   |                           |   | 1                                 | Uniforme      |
| Índice de uniformidad normalizado     | $NUI = \frac{\sum_{i=1}^n (te_{p0} - te_{pi})}{n \cdot \bar{te} \cdot 100}$                                 | División El Salvador 2000 | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tonelajes puntuales y promedio</li> <li>➤ número de vecinos</li> </ul>                                     | [0,1[                             | Uniforme      |
|                                       |   |                           |   | [1,2[                             | Semi-Uniforme |
|                                       |   |                           |   | [2,∞[                             | No Uniforme   |
| Índice de uniformidad de la pendiente | $SUI = 1 - \frac{1}{90} \cdot tg^{-1} \left( \frac{t_{max} - t_{min}}{(n-1) \cdot 100} \right)$             | Santibañez 2008           | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tonelajes máximo y mínimo</li> <li>➤ número de vecinos</li> </ul>  | 1                                 | Uniforme      |
|                                       |   |                           |   | 0                                 | No Uniforme   |

Desde el punto de vista de la cantidad de información que se utiliza en la caracterización del tipo de tiraje, el índice que utiliza la mayor cantidad de parámetros que caracterizan la forma en que se realiza la extracción en la vecindad es el índice de uniformidad de Susaeta (2004). Lo anterior se debe a que ningún otro índice castiga la inactividad absoluta de un punto de extracción.

## **2.6 FUNDAMENTOS DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN REBOP**

REBOP o “rapid emulator based on PFC3D” (simulador veloz basado en PFC3D) es una herramienta numérica de simulación de flujo de roca fragmentada desarrollada por el ICS y la MMT basada en los mecanismos de flujo observados en PFC3D y posteriores modelos físicos para la simulación de la evolución de los elipsoides de extracción y su interacción (Itasca, 2007). El algoritmo basa su funcionamiento en el crecimiento y propagación del elipsoide de movimiento (o “Isolated mobilized zone”, IMZ) producto del material que es extraído en el punto de extracción (Lorig and Cundall 2000). Y entrega reportes de tonelaje y leyes extraídos por punto y período según la carta de extracción que se le asigne, además reportes con marcadores que poseen atributos correspondientes al modelo de bloques (tipos de roca, leyes, contenido de dilución, etc.). Es importante destacar que REBOP no realiza suposiciones previas acerca de la geometría de los elipsoides de movimiento, sino que permite que ésta se genere a partir de “micro-reglas” que gobiernan el flujo (Carlson et al., 2004).

El modelo considera la discretización del medio en tajadas con forma de disco, las que componen el IMZ, éstas tajadas pueden crecer debido a la expansión lateral o a la adición de masa proveniente desde una tajada superior. El crecimiento de la IMZ es controlado por el colapso del arco de movimiento (en la vertical) y por la erosión (en la horizontal), además considera que el material puede adherirse desde una zona de menor porosidad a una de mayor porosidad dentro del elipsoide (Pierce, 2009). El colapso corresponde al fenómeno en el cual el material de una capa inferior es removido haciendo que el material correspondiente a la capa superior fluya descendentemente ocupando el vacío generado. Si el volumen de ambas capas es el mismo, la superior suplirá el espacio de la inferior completamente, de lo contrario, si el volumen de la capa superior es menor que el de la inferior, el material colapsado que desciende aumenta su porosidad. Por otro lado, la erosión corresponde al fenómeno que ocurre cuando el material que fluye se mueve en contacto con material que no fluye y lo hace comenzar a moverse debido al roce que lo erode. Para tener un registro del movimiento y calcular las leyes y otros atributos de los elementos que van siendo extraídos, el algoritmo discretiza el medio con marcadores que contienen las propiedades de los bloques sobre los cuales se dispusieron antes de comenzar el flujo.

### **2.6.1 Formulación matemática**

Como se menciona anteriormente, el crecimiento de la IMZ se realiza considerando discos que pueden migrar de manera descendente y crecer por los mecanismos de colapso y erosión. El algoritmo toma las propiedades del disco como el promedio de las

propiedades de los elementos que se encuentran en su interior, mientras que asigna al material estático el promedio de las propiedades del material estático ubicado en el contorno del disco.

Sea  $i$  un disco de la IMZ de radio  $R_i$ , si desde el disco inferior  $i-1$ , de radio  $R_{i-1}$  asciende un vacío de volumen  $v_i$  producto de la extracción, este vacío podrá llenarse por dos mecanismos (Figura 18):

- Colapso:  
El material del disco superior  $i+1$  fluye de manera descendente.
- Erosión:  
El disco  $i$  se dilata incorporando material estático del perímetro.

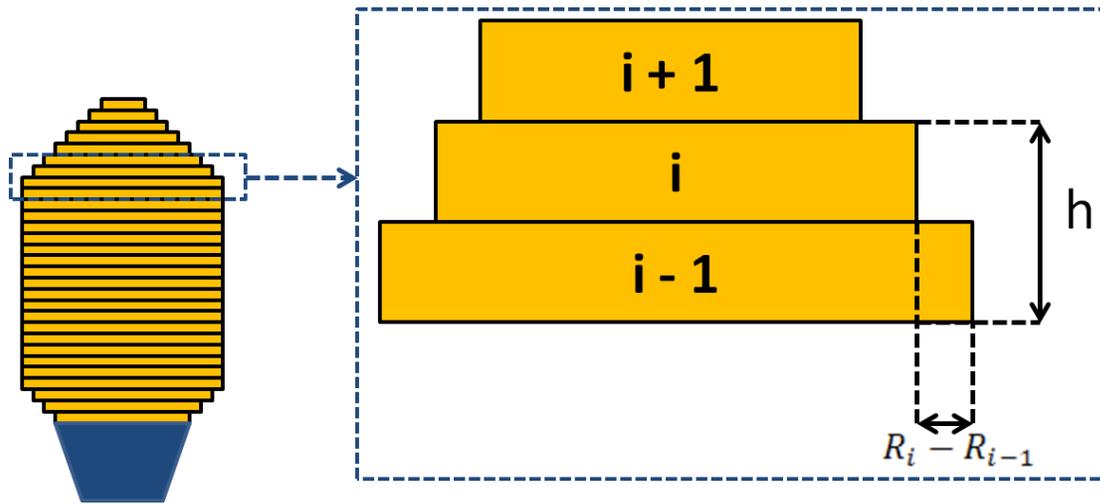


FIGURA 18: ILUSTRACIÓN CONCEPTUAL DE FORMULACIÓN DE IMZ

Primero se determina el material ocupado mediante el mecanismo de erosión, para la cual, se define la razón ( $r$ ) de volumen entre el material incorporado por erosión  $v_i^d$  y el volumen vacío  $v_i$  de la siguiente manera:

$$r = \frac{v_i^d}{v_i}$$

ECUACIÓN 7: RAZÓN DE VOLUMEN DE VACÍO OCUPADO POR EROSIÓN, PIERCE (2009)

Consideraciones de estabilidad dictan que  $r$  es una función del ángulo de desplome local  $\beta_i$  en los contornos del IMZ, definido como:

$$\beta_i = \frac{R_i - R_{i-1}}{h}$$

ECUACIÓN 8: ÁNGULO DE DESPLOME, PIERCE (2009)

Donde  $h$  es la altura del disco  $i$  más la del disco  $i-1$ .

En la parte superior de la IMZ,  $\beta_i$  es negativo, por lo que el mecanismo de erosión es mayor que el colapso. Así, se debe asumir la existencia de un ángulo umbral de desplome (negativo)  $\beta_t$ . De esta manera, si  $\beta_i$  es menor que  $\beta_t$ , entonces  $r$  es igual a 1 y todo el volumen vacío será ocupado por material incorporado por erosión.

Estudios experimentales dan cuenta de la existencia de una pendiente positiva mínima,  $\beta_{min}$ , para que exista expansión por erosión, ésta pendiente es función del ángulo de fricción del material estático ( $\phi$ ) como se muestra a continuación.

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

ECUACIÓN 9: PENDIENTE POSITIVA MÍNIMA, PIERCE (2009)

De esta forma, si  $\beta_i$  positivo es mayor o igual que  $\beta_{min}$ , entonces no habrá erosión y  $r$  será igual a cero, asignando todo el volumen vacío a la ocupación de espacio de la tajada superior.

Así, considerando ambos casos, se determina el valor de  $r$  como una función del diámetro medio del material ( $d$ ), el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la altura de ambos discos ( $h$ ) y un parámetro de control de crecimiento lateral ( $q$ ).

$$r = \frac{10 \cdot d \cdot h}{\pi \cdot R_i^2} \left( \max\left(0, 1 - \frac{(R_i - R_{i-1}) \cdot \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}{h}\right) \right)^q$$

ECUACIÓN 10: RAZÓN DE VOLUMEN DE VACÍO OCUPADO POR EROSIÓN COMO FUNCIÓN DE PROPIEDADES DEL MATERIAL, PIERCE (2009)

Obtenido el valor de  $r$ , se calcula el nuevo valor del radio del disco  $i$ ,  $R'_i$ , considerando las porosidades del material estático ( $n_1$ ) y dentro de la IMZ ( $n_0$ ).

$$R'_i = \sqrt{R_i^2 + \frac{r \cdot v_i}{\pi \cdot h \cdot (n_1 - n_0)}}$$

ECUACIÓN 11: RADIO DEL DISCO INCREMENTADO POR EROSIÓN, PIERCE (2009)

Además, se calcula el volumen que será ocupado por el disco superior  $i+1$  como:

$$v_{i+1} = (1 - r) \cdot v_i$$

ECUACIÓN 12: VOLUMEN OCUPADO POR DISCO SUPERIOR, PIERCE (2009)

Luego el cálculo se repite para el volumen dejado por el movimiento de material del disco  $i+1$  en el disco  $i+1$ .

De alcanzar la superficie, el balance de masa hará que la topografía disminuya y el IMZ se expanda lateralmente generando en sí mismo un incremento de volumen y porosidad.

Por su parte, los límites del IEZ (elipsoide de extracción) quedan fijados por la ubicación original del material que ha sido extraído en los puntos de extracción y no poseen una relación ni formulación matemática con ningún parámetro de entrada de manera directa.

Como se menciona anteriormente, la asignación de las propiedades del material extraído se realiza a través de una discretización del medio en que se encuentra el mineral (modelo de bloques) para asignar trazadores o marcadores que contienen las propiedades del bloque al cual pertenecían antes de comenzar la extracción, la masa asignada al marcador al salir dependerá de la porosidad inicial que el bloque al cual pertenecía haya tenido ( $n_o$ ), la densidad de este bloque ( $\rho$ ) y el espaciamiento original (generado por la discretización) de los marcadores ( $s$ ). Así, la masa ( $m$ ) del marcador será:

$$m = s^3 \cdot (1 - n_o) \cdot \rho$$

ECUACIÓN 13: MASA DEL MARCADOR EXTRAÍDO, PIERCE (2009)

Es evidente que la discretización (más o menos densa) del medio en el cual se encuentra el mineral repercutirá en la precisión de la predicción de los atributos de los marcadores extraídos, así como en el tiempo de simulación que tomará el algoritmo (inversamente proporcional al espaciamiento entre marcadores).

## 2.6.2 Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada para la simulación de flujo a través de REBOP son el modelo bloques, los puntos de extracción con sus respectivas geometrías de batea, la carta de extracción y un arreglo de marcadores (opcional) para observar el flujo.

### a. Modelo de bloques

El modelo de bloques es una representación en paralelepípedos regulares que almacenan información y poseen una ubicación espacial. Esta representación corresponde al yacimiento, y para REBOP, el modelo de bloques se compone de los siguientes atributos:

- Ubicación espacial del centroide (coordenadas)
- Período de quiebre (Cave Period)  
Indica el período desde el cual el bloque está dispuesto a fluir.
- Leyes (de N elementos)
- Densidad sólida del bloque
- Porosidad in-situ de material (previa al esponjamiento)
- Porosidad máxima del material  
Corresponde a aquella que alcanza en la batea.
- Ángulo de fricción del material

- Diámetro medio  
Diámetro medio esperado producto de la fragmentación primaria del bloque. El modelo asume que esta distribución será gaussiana.
- Desviación estándar del diámetro  
Desviación estándar de la fragmentación primaria del bloque.
- UCS  
Resistencia a la compresión uniaxial del bloque.

**b. Puntos de extracción y geometría de bateas**

Los puntos de extracción poseen una ubicación espacial y la asignación de una batea, la cual puede compartir con otro punto de extracción. Por su parte las bateas definen su geometría con una serie de parámetros geométricos relativos a su altura y los ángulos formados por sus paredes.

**c. Marcadores**

El modelo permite ingresar marcadores de manera de observar el flujo. Estos marcadores no poseen masa y son útiles para representar marcadores reales ubicados en la mina. Se ingresan con un nombre y una ubicación espacial.

**2.6.3 Validaciones y calibraciones anteriores**

Hasta la fecha, REBOP ha sido calibrado con modelos físicos (experimentos de tiraje aislado en JKRCM) obteniéndose resultados satisfactorios. Desde el punto de vista de calibración y validación con datos de mina, el trabajo realizado por Vargas (2010) resulta de interés para el presente trabajo de tesis por cuanto representa una comparación con datos de operaciones de block/panel caving de CODELCO-Chile. Éste consiste en el desarrollo de una metodología en el diseño de mallas de extracción en block/panel caving incorporando back-analysis. En él, Vargas realiza una validación y calibración de REBOP como herramienta de diseño con datos de los sectores Esmeralda, Diablo Regimiento, 4 Sur y Reservas Norte de la mina El Teniente.

**a. Revisión de metodología**

Para la calibración de la herramienta utiliza un set de parámetros que definen distintas geometrías de elipses de movimiento, las cuales se resumen en la tabla siguiente.

TABLA 2: SETS DE PARÁMETROS PARA CALIBRACIÓN REBOP (VARGAS, 2010)

| Parámetros                | Unidades         | Set 1 | Set 2 | Set 3 | Set 4 |
|---------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| Fragmentación             | m                | 1     | 1     | 0.5   | 1.5   |
| Desv. Est. Fragmentación  | m                | 0.4   | 0.4   | 0.3   | 0.5   |
| Ángulo de fricción        | °                | 50    | 30    | 30    | 30    |
| Ángulo de flujo           | °                | 70    | 60    | 60    | 60    |
| Densidad mineral en flujo | t/m <sup>3</sup> | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   |

Se definen a su vez las variables que serán comparadas como:

- Finos mensuales:  
Tonelaje de cobre fino mensual en cada punto de extracción. El valor real será aquel presente en los reportes de extracción de los sectores que a su vez es muestreado en los puntos de extracción, mientras que el valor simulado será aquel que entregue el reporte de REBOP.
- Altura de interacción:  
Altura desde el nivel de hundimiento en la cual se encuentra la interfaz entre el pilar de roca intacta y el material en flujo. El valor real será aquel resultante del cálculo de la interfaz en los sondajes de mineral remanente realizados en la mina, mientras que el simulado se extrae de REBOP.
- Ley de sondajes:  
Correspondiente a la ley del mismo sondaje de mineral remanente utilizado para calcular la altura de interacción. El valor real será considerado como el resultante del muestreo en la mina, mientras que el simulado corresponde a un sondaje virtual realizado en el modelo de bloques modificado por la extracción en REBOP, el cual se composita y se obtiene la ley.
- Punto de entrada de dilución:  
Corresponde al tonelaje de extracción acumulado en un punto sobre el cual comienza la aparición de material diluyente en el punto. El valor real será aquel identificado con marcadores naturales provenientes de niveles anteriores en la mina, mientras que el simulado se calcula desde el archivo de marcadores de REBOP, que indica la fecha en la cual se extrae el primer marcador con material diluyente.

Se definen los índices de comparación del error como:

- Error cuadrático medio (RMSE):  
Corresponde a la medida de las diferencias promedio entre los valores simulados y medidos en la mina, se calcula a través de la siguiente fórmula.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Vsim - Vobs)^2}{N}}$$

ECUACIÓN 14: ERROR CUADRÁTICO MEDIO (PIELKE, 1984)

Donde:

- $V_{sim}$ : valor simulado del dato
- $V_{obs}$ : valor observado del dato
- N: cantidad de datos

- **Error relativo:**  
Corresponde al cociente de la diferencia del valor observado con el valor real.

$$Error\ relativo\ [\%] = \frac{Vsim - Vobs}{Vobs} \cdot 100$$

ECUACIÓN 15: ERROR RELATIVO, VARGAS (2010)

- **Error total ponderado:**  
Se construye como una suma ponderada de los errores de cada variable y las ponderaciones corresponden al grado de certeza asociado a las mediciones reales de los datos.

$$Error\ total = k1 \cdot E_{Finos(<PED)} + k2 \cdot E_{Finos(>PED)} + k3 \cdot E_{PED} + k4 \cdot E_{Sondaje} + k5 \cdot E_{HIZ}$$

ECUACIÓN 16: ERROR TOTAL PONDERADO, VARGAS (2010)

De esta manera, se obtiene por sector y por set de parámetros los errores, según se ilustra en la Figura 19.

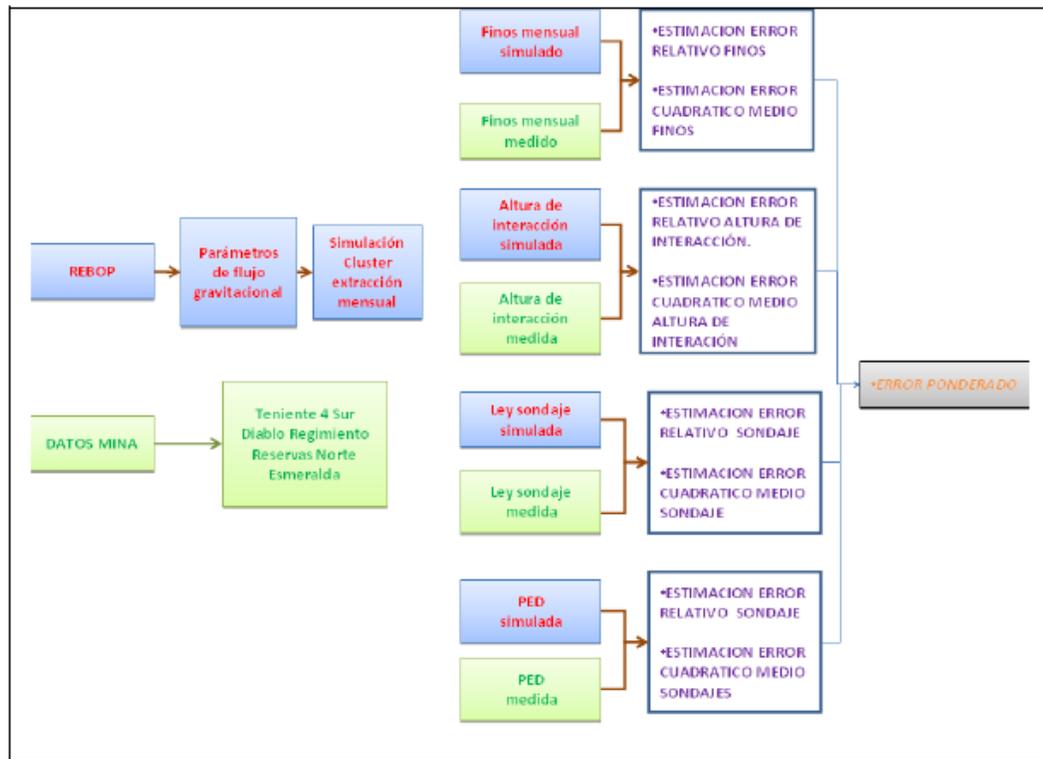


FIGURA 19: PROCEDIMIENTO REALIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DEL ERROR PONDERADO (VARGAS, 2010)

### b. Análisis de resultados

Como resultados principales, Vargas obtiene que el fino posee errores relativos entre 0.1% hasta un 24%, mientras que la altura de interacción presenta errores absolutos de 2 a 9 (m), para rangos de altura de interacción entre 20 y 25 (m). La ley de sondajes

tiene errores de 10% en 4 Sur, 25% en Esmeralda y 55% en RENO, hecho que el autor adjudica a una subestimación de reservas en el modelo de bloques. Con respecto al punto de entrada de dilución sucede un fenómeno importante de destacar, para el caso del Diablo Regimiento, que constituye el único sector donde se incluye la propagación del caving en las simulaciones, ocurre que la estimación del PED resulta extremadamente sensible a la inclusión del cave back en el tiempo, puesto que el error en la estimación del PED pasa de un 30% a un 0.2% para el mejor de los casos. De esta manera, se desprende un hecho importante a considerar en la validación y calibración de REBOP.

Como conclusiones, Vargas añade que:

- Aún bajo condiciones de extracción no ideales (tiraje desuniforme y zonas colapsadas) REBOP es capaz de adaptarse y simular flujo de forma aceptable.
- La herramienta entrega de forma clara altura de interacción entre elipsoides de extracción.
- REBOP puede ser considerado como una herramienta de diseño válida (enmarcado dentro de la cuantificación de la recuperación de una malla).

## 2.7 CONCLUSIONES

Con respecto a los modelos actuales de comportamiento de la dilución es posible concluir lo siguiente:

- Tanto el modelo de Laubscher (1994, 2000) como el de Susaeta (2004) establecen como principio fundamental para el control de la dilución la práctica de controlar el tiraje en términos de toneladas extraídas con el objetivo de maximizar la uniformidad y garantizar de esta manera la interacción de las zonas (elipsoides) de movimiento para generar flujo en masa del material fragmentado. Esta práctica es posible a través del control de tiraje a partir de índices de uniformidad que resultan relativamente simples de calcular en una operación de hundimiento. Sin embargo, en teoría, controlar la uniformidad de la extracción en términos de tonelajes no tiene mucho sentido para la explotación de un panel cuyas alturas de columna in-situ (hasta el material quebrado proveniente de un sector previamente explotado) poseen diferencias significativas unas de otras.
- Ninguna de las aproximaciones del comportamiento de la dilución llevadas a cabo hasta hoy consideran de manera explícita o implícita la influencia de la posición inicial del material diluyente con respecto al panel que entrará en explotación ni la secuencia de extracción que se adopte con respecto a esta posición.

De esta manera, el análisis de los datos de operaciones debe considerar una revisión de la uniformidad con que se realiza la extracción de los puntos y compararla con la entrada de material diluyente en éstos. Lo anterior debe realizarse sin perder de vista la

influencia de las condiciones de borde, tales como la ubicación del material diluyente previo a la extracción, que pudieran tener los paneles a analizar y la estrategia de extracción de estos mismos.

TABLA 3: RESUMEN MODELOS DE DILUCIÓN

| Autor     | Variables que afectan comportamiento dilución consideradas en modelo de flujo |                            |                   |                                   |                       |                             | Índices introducidos  |                                |
|-----------|---|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|           | Uniformidad de extracción   | Espaciamiento entre puntos | Altura de columna | Propiedades del material en flujo | Propagación de caving | Ubicación inicial diluyente | Control de extracción | Predicción entrada de dilución |
| Laubscher | ✓   | ✓                          | ✓                 | ✓                                 | X                     | X                           | ✓ (DCF)               | ✓ (PED)                        |
| Susaeta   | ✓   | ✓                          | ✓                 | ✓                                 | X                     | X                           | ✓ (IU)                | X                              |

Con respecto a la herramienta de simulación de flujo gravitacional REBOP, es posible concluir que:

- La formulación fundamental de REBOP considera que los elipsoides de movimiento se forman a partir de la extracción y las propiedades del material fragmentado. Estas propiedades no representan necesariamente los valores de los parámetros físicos medibles del material, por lo que deben ser calibradas con la información histórica de la extracción del sector que se desea simular.
- Del estudio de validación y calibración de REBOP con datos de El Teniente realizado por Vargas (2010) se desprende que la incorporación del perfil del cave back a lo largo del tiempo representa un factor determinante en la precisión de la reproducción del flujo gravitacional por parte de la herramienta de simulación. Este resultado considera un horizonte de corto plazo, por lo tanto, la aseveración debe ser verificada para el largo plazo.

Es claro que debe incorporarse el perfil del cave back como variable en la etapa de comparación de REBOP con la extracción histórica de los paneles a analizar. Además se debe encontrar de manera independiente para cada sector la combinación de propiedades del material fragmentado que represente la mejor reproducción de la realidad para establecer los alcances de la herramienta y formular la prueba de hipótesis considerando todo lo anterior.

# CAPÍTULO 3

---

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología a través de la cual se desarrolla el trabajo de tesis se detalla en el presente capítulo (Figura 20). Ésta se divide en 4 etapas principales, las cuales se construyen con el objetivo de llevar a cabo un estudio que permita abordar la entrada de la dilución desde una perspectiva independiente basada en el análisis de datos históricos de operaciones de block/panel caving y cuyas principales hipótesis puedan probarse tanto desde el punto de vista físico como de la teoría de flujo gravitacional. Las etapas que componen la metodología del presente trabajo son las siguientes:

- Construcción de bases de datos y de una herramienta para la visualización y análisis de datos de operaciones de block/panel caving.
- Análisis de datos de dilución de operaciones de block/panel caving con el objetivo de establecer hipótesis acerca de los mecanismos de entrada de dilución en función de la información disponible.
- Comparación de la herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional con los datos provenientes de la mina utilizando la información disponible con el objetivo de establecer su capacidad y limitaciones para reproducir el flujo gravitacional de una operación de block/panel, caving.
- Prueba de principales hipótesis a través de:
  - Análisis de factibilidad mecánica del mecanismo.
  - Utilización de la herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional.

### 3.1 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS Y HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE DATOS DE OPERACIONES DE BLOCK/PANEL CAVING

En esta etapa se colecta y analiza la información de producción de las operaciones subterráneas de CODELCO. La información colectada corresponde tanto a datos de producción como de geología y geomecánica, la que incluye: tonelaje extraído, leyes muestreadas en los puntos, marcadores geológicos (tipos de roca, material quebrado, lixiviado, etc.), otros tipos de marcadores (infraestructura preexistente o rieles, maderas y pedazos de concreto provenientes de otros sectores), y desarrollo (temporal) del cave back.

Además, tanto en El Salvador como Andina, existe un registro del porcentaje de dilución observada en los puntos de extracción.

Cabe destacar que la construcción y análisis de la base de datos debe cumplir con dos tareas principales, la primera es definir los sectores a utilizar en el análisis de los datos de dilución para la construcción de las hipótesis de los mecanismos que controlan su entrada, ya la segunda corresponde a la elección de los sectores a simular para la calibración de REBOP.

De esta forma, esta etapa se divide en las siguientes tareas específicas:

- Recolección de datos de extracción, geología y geomecánica de las operaciones actuales de block/panel caving de CODELCO (El Salvador, El Teniente, Andina).
- Desarrollo de una herramienta computacional para visualización y análisis de datos de minas de block/panel caving (Syscave<sup>®</sup>).
- Realizar un análisis de los datos colectados, de manera de definir los sectores a utilizar en el estudio de mecanismos de entrada de la dilución.
- Realizar un análisis de los datos colectados, de manera de definir una base de datos con la suficiente cantidad y calidad de datos para utilizar en la verificación de REBOP.

### **3.2 ANÁLISIS DE DATOS DE DILUCIÓN DE OPERACIONES DE BLOCK/PANEL CAVING**

Una vez construida la base de datos para el estudio de entrada de dilución, en esta etapa, se analizan los datos de operaciones en busca de establecer hipótesis acerca de la entrada de dilución en los puntos de extracción. El análisis se realiza sector a sector teniendo en cuenta las condiciones de borde de cada uno que incluyen:

- Alturas de columna in-situ (hasta el material diluyente).
- Uniformidad de la extracción.
- Secuencia de extracción.

Estas condiciones son comparadas con el punto de entrada del material diluyente en función del porcentaje de extracción de columna in-situ -el cual se define a partir de un criterio generalizado basado en el análisis de las curvas de dilución de todos los puntos de extracción- para establecer hipótesis acerca de la causalidad de la entrada de dilución (temprana o tardía) en los sectores productivos.

Se establecen de esta forma la hipótesis de entrada de dilución para cada sector productivo.

### **3.3 COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS**

Habiéndose construido la base de datos para la comparación de REBOP con datos de minas y establecido las hipótesis de entrada de dilución, el estudio de comparación se divide en dos fases. La primera corresponde a una revisión práctica basada en simulaciones utilizando ejemplos simples de manera de establecer un análisis de sensibilidad de los principales parámetros de entrada de la herramienta de simulación. La cual a su vez se divide en tiraje aislado (un solo punto de extracción) y tiraje múltiple (más de un punto extrayendo en el mismo período de tiempo).

La segunda fase corresponde a una comparación de REBOP con los datos de las operaciones de CODELCO-Chile. Ésta se lleva a cabo tanto a nivel de puntos de extracción como de sectores productivos y el objetivo principal es determinar la capacidad de REBOP para:

- Reproducir el tonelaje asignado por las cartas de extracción.
- Reproducir las leyes extraídas.
- Reproducir la entrada de dilución (estimada a través de los marcadores geológicos).

Además de establecer los parámetros de entrada que poseen los menores errores de reproducción del flujo gravitacional para cada sector.

Así, las tareas específicas a realizar para la comparación de REBOP con datos de operaciones son:

- Revisión práctica de REBOP como herramienta de simulación.
- Definición de él o los índices de comparación a utilizar en la comparación de REBOP.
- Simulación y comparación de la extracción histórica de los sectores seleccionados con distintos sets de parámetros determinados en base a la revisión práctica y a la información disponible.
- Conclusiones y recomendaciones acerca de la capacidad de REBOP para la simulación de flujo de material quebrado en minas de block/panel caving incluyendo entrada de dilución a nivel de sector y de puntos de extracción.

### **3.4 PRUEBA DE PRINCIPALES HIPÓTESIS**

Una vez establecidas las hipótesis de entrada de dilución y la capacidad y limitaciones de REBOP para reproducir el flujo gravitacional de las operaciones de hundimiento (en particular la entrada de dilución), se procede a evaluar la factibilidad física -desde el punto de vista geomecánico y de la teoría de flujo gravitacional- de él o los mecanismos principales de entrada de dilución. Para ello, se realiza lo siguiente:

- Análisis de estabilidad del material quebrado y evaluación de la factibilidad mecánica de las condiciones necesarias para que el material realice los movimientos propuestos en el mecanismo correspondiente.
- Definición de sector representativo para prueba de hipótesis.
- Generación de condiciones de entrada de simulación para reproducción de mecanismo.
- Simulación de extracción histórica de sector representativo con condiciones de entrada generadas.
- Conclusión acerca de la validez del mecanismo desde el punto de vista mecánico y de la teoría de flujo gravitacional.

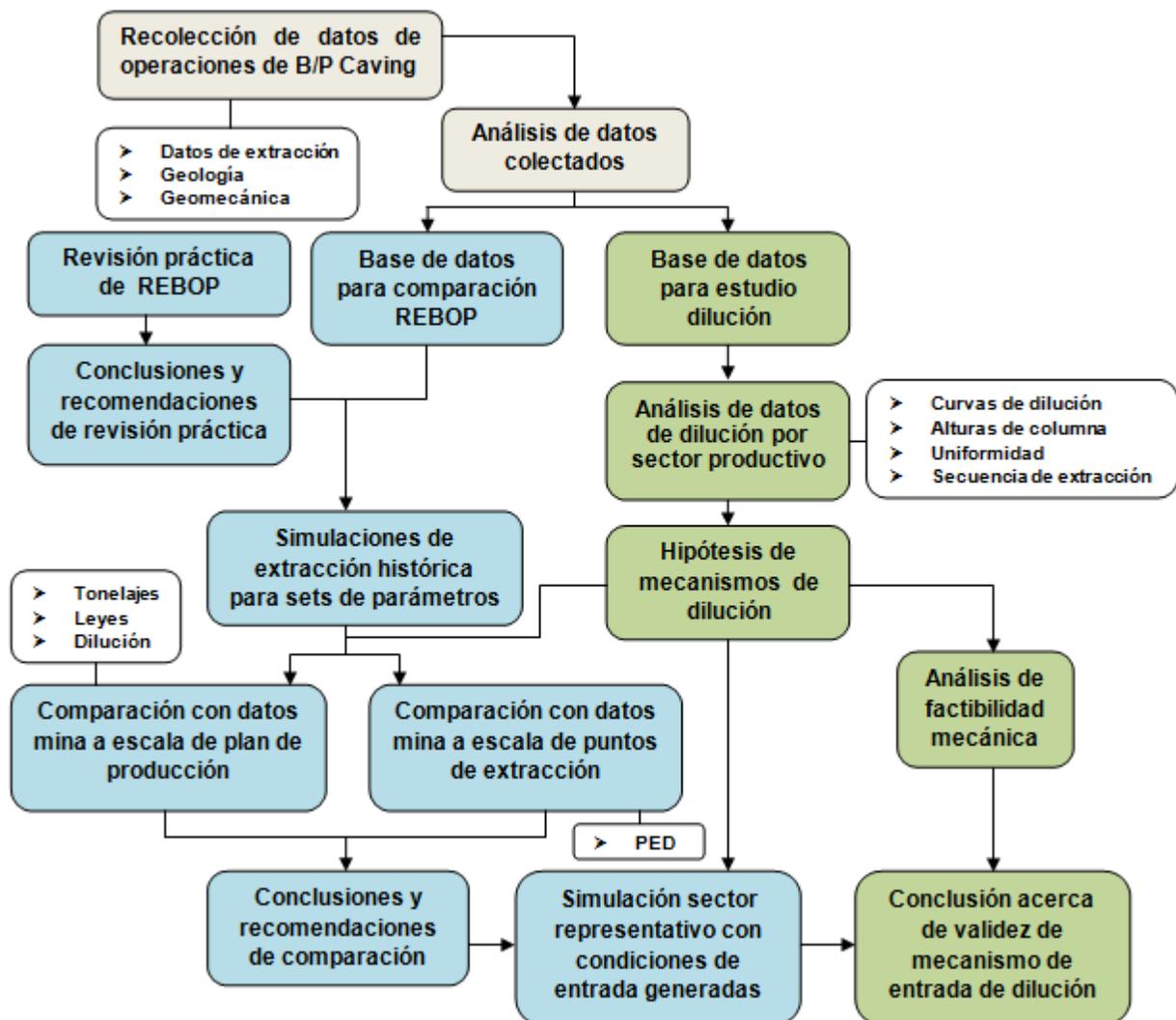


FIGURA 20: DIAGRAMA DE FLUJO METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

# CAPÍTULO 4

## CONSTRUCCIÓN DE LAS BASES DE DATOS Y HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

En el presente capítulo se detalla la construcción de las bases de datos que serán utilizadas en la comparación de REBOP con datos de minas y el estudio de los mecanismos de entrada de dilución. Además, se presentan los fundamentos del desarrollo de la herramienta de análisis de datos de minas de block/panel caving desarrollada para este trabajo de tesis, los que incluyen las metodologías de cálculo de los diferentes índices que serán utilizados a lo largo del trabajo.

### 4.1 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS

En el contexto del MMT (Mass Mining Technology Project) se genera una colección de información de las operaciones subterráneas de CODELCO-Chile que incluye datos de geología, control de producción y geomecánica de las divisiones El Salvador, El Teniente y Andina. Esta información es utilizada para generar las bases de datos del presente trabajo de tesis. La Tabla 4 resume la información colectada de las operaciones de hundimiento de CODELCO-Chile.

TABLA 4: INFORMACIÓN COLECTADA DE LAS OPERACIONES DE CODELCO-CHILE

| División de CODELCO | Sector productivo  |      | Información general   | Tonelajes y leyes extraídas  | Estimación del contenido de dilución   | Propagación del Cave Back   |
|---------------------|--------------------|------|---|--|--|---|
| El Teniente         | Diablo Regimiento  | DR   | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Modelos de bloque</li> <li>➤ Topografía y otras superficies</li> <li>➤ Diseños de bateas</li> <li>➤ Cotas niveles de extracción y hundimiento</li> </ul> | Tonelajes y leyes extraídos a nivel de puntos de extracción a escala de turno, consolidada con mediciones en la planta de tratamiento. | Se estima entrada de dilución con reportes de marcadores artificiales provenientes de sectores explotados previamente.   | Estimado a través de base de datos de eventos sísmicos y TDR's, calibrado con extracción. |
|                     | Esmeralda          | ES   |   |  |  |   |
|                     | Reservas Norte     | RENO |   |  |  |   |
| El Salvador         | Inca Central Este  | ICE  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Topografía y otras superficies</li> <li>➤ Diseños de bateas</li> <li>➤ Cotas niveles de extracción y hundimiento</li> </ul>                              | Tonelajes y leyes extraídos a nivel de puntos de extracción a escala de turno, consolidada con mediciones en la planta de tratamiento. | Estimación de contenido de dilución (limonita) a través de observaciones mensuales en puntos de extracción, desde el comienzo hasta el final de la extracción de los sectores. | No hay información disponible.  |
|                     | Inca Central Oeste | ICW  |   |  |  |   |
|                     | Inca Norte         | IN   |   |  |  |   |
|                     | Inca Oeste         | IW   |   |  |  |   |
| Andina              | Panel III          |      |   |  | Estimación de contenido de dilución (riolita y quebrado) a través de observaciones mensuales en puntos de extracción, desde enero de 2006.                                     | No hay información disponible.  |

Desde el punto de vista del estudio de los mecanismos de entrada de dilución, la información más relevante de la colección corresponde a la estimación del contenido de dilución a través de marcadores (geológicos o artificiales). En el caso de El Teniente, se utiliza infraestructura proveniente de sectores previamente explotados para estimar la entrada de dilución. Esta información es recabada por el personal de Control Producción Mina (CPM). De similar forma, en El Salvador, el personal de CPM recaba la información del contenido de limonita (porcentaje observado por punto de extracción). Mientras que en División Andina, personal capacitado de Geología recaba información de los porcentajes de riolita y material quebrado proveniente de la explotación del Panel II observados en los puntos de extracción. Tanto para El Salvador como para Andina, la observación y estimación con juicio experto del contenido de marcadores geológicos en los puntos de extracción se realiza cada 2000 toneladas extraídas junto con el muestreo de leyes.

Debido a que cada variable es estimada utilizando distintos protocolos tanto en el modelo de bloques como en los puntos de extracción, la base datos contiene errores de medición intrínsecos de cada método de estimación. Ante esto, y a pesar de que la información de control producción está consolidada con las mediciones de la planta de tratamiento, se realiza un filtro de datos anómalos y erróneos. La Tabla 5 muestra los datos eliminados por división de acuerdo a los criterios establecidos.

TABLA 5: DATOS ELIMINADOS DE LA BASE DE DATOS ORIGINAL

| División de Codelco | Número de puntos de extracción eliminados por criterio |                            |                            |                               |                 |                 |                   |                   | Total |
|---------------------|--|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|
|                     | Sin información espacial                               | Con leyes y sin extracción | Sin leyes y con extracción | Con dilución y sin extracción | Anómalos ley Cu | Erróneos ley Cu | Anómalos dilución | Erróneos dilución |       |
| El Teniente         | 3  | 2                          | 3                          | 0                             | 0               | 2               | 0                 | 0                 | 10    |
| El Salvador         | 5  | 3                          | 2                          | 4                             | 2               | 3               | 0                 | 0                 | 19    |
| Andina              | 5  | 2                          | 4                          | 2                             | 0               | 2               | 0                 | 2                 | 17    |
| <b>Total</b>        | 13   | 7                          | 9                          | 6                             | 2               | 7               | 0                 | 2                 | 46    |

Es importante destacar que, para efectos del trabajo de tesis, se asume que la información contenida en la base de datos posterior al filtro es representativa de las leyes, tonelajes y dilución presentes en el modelo de bloques y extraídos.

Conforme a lo anterior y debido a que la estimación del contenido de dilución en El Teniente no cuenta con la robustez suficiente para un análisis que contemple las curvas de dilución de los puntos de extracción, la base de datos para el estudio de los mecanismos de entrada de dilución corresponde a los datos de geología y control de producción de los sectores de El Salvador y el Panel III de Andina (desde 2006). Por otra parte, la base de datos que se utiliza en la comparación de REBOP con datos de mina corresponde a la información de geología, control de producción y geomecánica de las 3 divisiones de CODELCO-Chile. La principal razón por la cual se incluye la información proveniente de la división El Teniente en la base datos para la comparación de REBOP

es que sólo en los sectores de esta división existen mediciones de avance del cave back. Estas mediciones se construyen a través de datos de eventos sísmicos y observaciones en terreno del desplome, además se calibran con datos de extracción y corresponden a colecciones de superficies rotuladas por mes. Mayor información con respecto a las superficies se detalla en el Capítulo 6.

#### 4.1.1 Base de datos para el estudio de los mecanismos de entrada de dilución

Tal como se indica anteriormente, la base de datos para el estudio de los mecanismos de entrada de dilución corresponde a la información de la extracción histórica completa de los sectores de El Salvador y los registros de 2006 en adelante para el Panel III de Andina. En el caso de El Salvador, la información de control producción contiene la extracción histórica turno a turno de tonelajes, leyes y contenido de limonita para cada punto de extracción. Mientras que la información colectada de Andina contiene, por un lado, la extracción histórica turno a turno de tonelajes y leyes para cada punto de extracción y, por otro lado, la información del muestreo de Geología en los puntos que indica el contenido de riolita y material quebrado. De esta forma, se hace necesario para la construcción de la base de datos de dilución de Andina consolidar los datos de extracción con los del muestreo de dilución. Esta consolidación se realiza asignando, para cada punto de extracción, el último contenido de dilución muestreado en la fecha de extracción correspondiente.

Considerando que la información de dilución de Andina existe desde 2006 en adelante y de manera de analizar las curvas de dilución de la vida completa de los puntos de extracción, se define el universo de puntos a analizar como todos aquellos que fueron abiertos desde enero de 2006. De esta manera quedan definidos 2 clusteres de dilución, el primero compuesto por los puntos del sector de parrillas que fueron abiertos desde 2006 en adelante y el segundo por sus homólogos en el sector LHD. La Figura 21 ilustra la ubicación de los clusteres en una vista en planta de los puntos de extracción del Panel III de Andina.

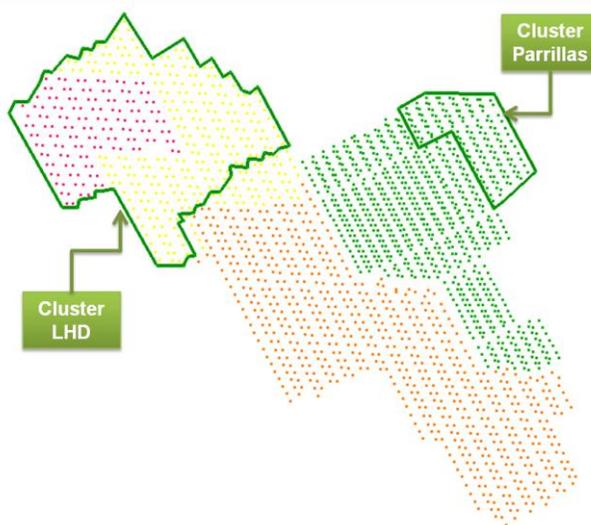


FIGURA 21: CLUSTERES DE DILUCIÓN - VISTA EN PLANTA PUNTOS DE EXTRACCIÓN PANEL III

La Tabla 6 y Tabla 7 resumen las estadísticas de la base de datos del estudio de los mecanismos de entrada de dilución para El Salvador y Andina, respectivamente.

TABLA 6: ESTADÍSTICAS DE BASE DATOS DE DILUCIÓN PARA EL SALVADOR

| Sector | Número de puntos |              | Limonita extraída (kt, mensual) |            | Número de Períodos (meses) |
|--------|------------------|--------------|---------------------------------|------------|----------------------------|
|        | Con extracción   | Con Limonita | Media                           | Desv. Est. |                            |
| ICE    | 108              | 97           | 5.7                             | 8.1        | 88                         |
| ICW    | 471              | 289          | 14.9                            | 14.2       | 133                        |
| IN     | 578              | 537          | 27.1                            | 28.3       | 203                        |
| IW     | 202              | 170          | 13.8                            | 11.7       | 189                        |

TABLA 7: ESTADÍSTICAS DE BASE DE DATOS DE DILUCIÓN PARA ANDINA

| Cluster del Panel III | Número de puntos |             |              |              | Riolita extraída (kt, mensual) |            | Quebrado extraído (kt, mensual) |            | Número de Períodos (meses) |
|-----------------------|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------------|------------|---------------------------------|------------|----------------------------|
|                       | Con extracción   | Con Riolita | Con Quebrado | Con Dilución | Media                          | Desv. Est. | Media                           | Desv. Est. |                            |
| Cluster Parrillas     | 148              | 147         | 147          | 147          | 13.1                           | 11.4       | 25.0                            | 17.4       | 50                         |
| Cluster LHD           | 397              | 150         | 137          | 167          | 10.5                           | 18.7       | 10.1                            | 13.5       | 74                         |

#### 4.1.2 Base de datos para la comparación de REBOP con datos de minas

Como se menciona anteriormente, la base de datos utilizada para la comparación de REBOP con datos de minas corresponde a la información colectada de las 3 divisiones de CODELCO-Chile, la cual corresponden a un total de 4966 puntos con extracción y 573.8 (Mt) extraídas. La Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 muestran un resumen de las estadísticas básicas de extracción que componen la base de datos para las divisiones El Teniente, Andina y El Salvador, respectivamente.

TABLA 8: ESTADÍSTICAS DE EXTRACCIÓN PARA BASE DE DATOS DE EL TENIENTE

| Sector       | Número de puntos con extracción | Tonelaje extraído del sector (kt, mensual) |            | Leyes de Cu extraídas del sector (% mensual) |            | Número de períodos (meses) | Tonelaje total extraído (Mt) |
|--------------|---------------------------------|--|------------|--|------------|----------------------------|------------------------------|
|              |                                 | Promedio                                   | Desv. Est. | Promedio                                     | Desv. Est. |                            |                              |
| DR           | 202                             | 324.7                                      | 227.1      | 0.9  | 0.18       | 83                         | 26.9                         |
| ES           | 657                             | 666.9                                      | 300.6      | 1.15   | 0.18       | 171                        | 114                          |
| RN           | 578                             | 345  | 294.9      | 0.92   | 0.36       | 269                        | 92.8                         |
| <b>Total</b> | <b>1437</b>                     |  |            |  |            |                            | <b>233.7</b>                 |

TABLA 9: ESTADÍSTICAS DE EXTRACCIÓN PARA BASE DE DATOS DE ANDINA

| Sector    | Número de puntos con extracción | Tonelaje extraído de Panel III (kt, mensual) |            | Leyes de Cu extraídas de Panel III (% mensual) |            | Número de períodos (meses) | Tonelaje total extraído (Mt) |
|-----------|---------------------------------|--|------------|--|------------|----------------------------|------------------------------|
|           |                                 | Promedio                                     | Desv. Est. | Promedio                                       | Desv. Est. |                            |                              |
| Panel III | 2009                            | 1073   | 353        | 1.19   | 0.14       | 194                        | 209                          |

TABLA 10: ESTADÍSTICAS DE EXTRACCIÓN PARA BASE DE DATOS DE EL SALVADOR

| Sector       | Número de puntos con extracción | Tonelaje extraído del sector (kt, mensual) |            | Leyes de Cu extraídas del sector (% mensual) |            | Número de períodos (meses) | Tonelaje total extraído (Mt) |
|--------------|---------------------------------|--|------------|--|------------|----------------------------|------------------------------|
|              |                                 | Promedio                                   | Desv. Est. | Promedio                                     | Desv. Est. |                            |                              |
| ICE          | 108                             | 57.7                                       | 51.8       | 0.56   | 0.06       | 88                         | 5.1                          |
| ICW          | 471                             | 259.5                                      | 98.5       | 0.64   | 0.05       | 133                        | 34.5                         |
| IN           | 578                             | 297.6                                      | 205.2      | 0.57   | 0.11       | 203                        | 60.4                         |
| IW           | 202                             | 164.5                                      | 87.3       | 0.54   | 0.05       | 189                        | 31.1                         |
| <b>Total</b> | <b>1359</b>                     |  |            |  |            |                            | <b>131.1</b>                 |

La Tabla 11 resume la distribución de la información en la base de datos para cada división.

TABLA 11: RESUMEN DE DISTRIBUCIÓN DE SECTORES EN LA BASE DE DATOS

| División    | Sectores  |   |
|-------------|---|---|
|             | Utilizados en estudio de mecanismos de dilución   | Utilizados en comparación de REBOP  |
| El Teniente |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Diablo Regimiento (DR)</li> <li>➤ Esmeralda (ES)</li> <li>➤ Reservas Norte (RENO)</li> </ul>                                 |
| El Salvador | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inca Central Este (ICE)</li> <li>➤ Inca Central Oeste (ICW)</li> <li>➤ Inca Norte (IN)</li> <li>➤ Inca Oeste (IW)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inca Central Este (ICE)</li> <li>➤ Inca Central Oeste (ICW)</li> <li>➤ Inca Norte (IN)</li> <li>➤ Inca Oeste (IW)</li> </ul> |
| Andina      | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cluster LHD (CL)</li> <li>➤ Cluster Parrillas (CP)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Panel III</li> </ul>   |

## 4.2 CONSTRUCCIÓN DE HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE MINAS DE BLOCK/PANEL CAVING

Con el objetivo de contar con una herramienta que permita tanto la visualización y análisis de datos de operaciones de block/panel caving como la generación de archivos de entrada para REBOP y el posterior análisis de errores de las simulaciones, se desarrolla Syscave<sup>®</sup> en conjunto con el laboratorio ALGES (Advanced Laboratory for Geostatistical Supercomputing) como una aplicación computacional autónoma para el cumplimiento de este objetivo. La Figura 22 muestra el diagrama de flujo del diseño conceptual de Syscave<sup>®</sup>.

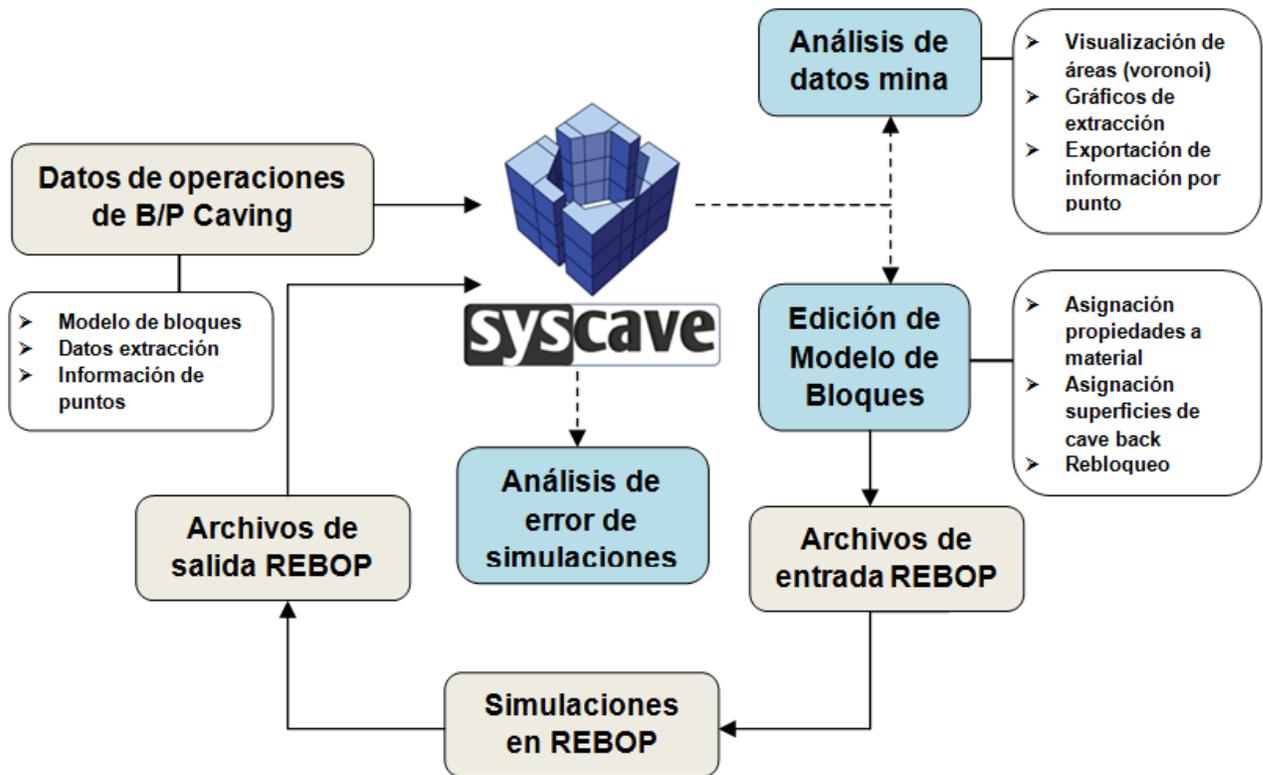


FIGURA 22: DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE SYSCAVE®

#### 4.2.1 Funcionalidades de la herramienta

Las funcionalidades de la herramienta van desde la generación y cálculo de las columnas in-situ de los puntos de extracción basadas en el algoritmo de Voronoi (1908) hasta el cálculo de estadísticas de extracción que incluyen tanto gráficos de leyes y dilución como el cálculo y visualización del índice de uniformidad de Susaeta (2004), además el software genera archivos de entrada para el simulador de flujo REBOP en base a los datos de mina. En esta sección se señalan los detalles de la ejecución de los algoritmos internos de Syscave® de manera general para las principales funcionalidades.

##### a. Generación de áreas de puntos

Como de menciona anteriormente, el cálculo básico para las funcionalidades de Syscave® se basa en la generación de las áreas de los puntos de extracción a través del algoritmo de Voronoi (1908). Éste consiste en construir rectas entre los puntos contiguos y dividir el espacio en la mitad de cada recta, de esta forma, se construyen los polígonos regulares que representan el área de influencia de cada punto (Figura 23).

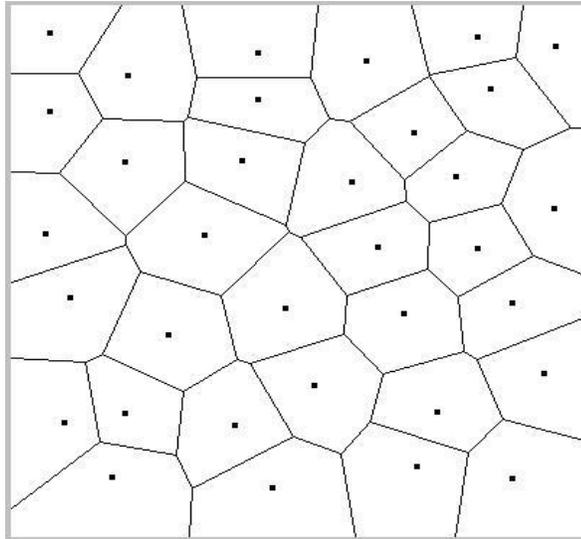


FIGURA 23: DIAGRAMA DE VORONOI

Al utilizar este algoritmo para definir el área de influencia de un punto de extracción, surge un problema debido a la influencia que tiene el área limitante del borde sobre la forma de los polígonos. Al establecer un área de contorno arbitraria y regular, los polígonos de los puntos se tornan extremadamente irregulares. El algoritmo interno de Syscave<sup>®</sup> soluciona este problema calculando primero el centro de masa del polígono conformado por las coordenadas de los puntos de extracción, luego se obtienen los 4 puntos más cercanos al centro de masas y se calcula la norma de los vectores que conforman los 4 puntos. Una vez obtenidas las normas, se procede a obtener el contorno límite del polígono. A partir de este polígono se calculan las proporciones de crecimiento para la extensión de la nueva malla de puntos (normalmente el doble tanto en el eje x como en el eje y). Se escoge un punto de partida desde el cual se creará una nueva malla de puntos avanzando horizontal y verticalmente según la norma obtenida. Como resultado se obtiene un conjunto extendido de puntos (que incluye los originales), sobre el cual se ejecuta el algoritmo de Voronoi (1908). Finalmente se descartan aquellos puntos ficticios, dejando los límites correctamente definidos para el polígono conformado por los puntos de extracción (Navarro, 2011). La Figura 24 ilustra el proceso de cálculo.

**b. Cálculo de alturas a superficie**

Syscave<sup>®</sup> permite la importación de superficies que pueden ser clasificadas como topografías, superficies de material quebrado o de cave back. De esta forma, la herramienta es capaz de realizar el cálculo desde un punto de extracción hasta la superficie indicada. Esto se logra a través de la realización de la proyección de este punto al plano (construido a través de los vértices del triángulo de la triangulación de la superficie) que lo contiene tal como muestra la Figura 25. La altura de cada punto hasta una superficie determinada se puede visualizar en una planta y exportar.

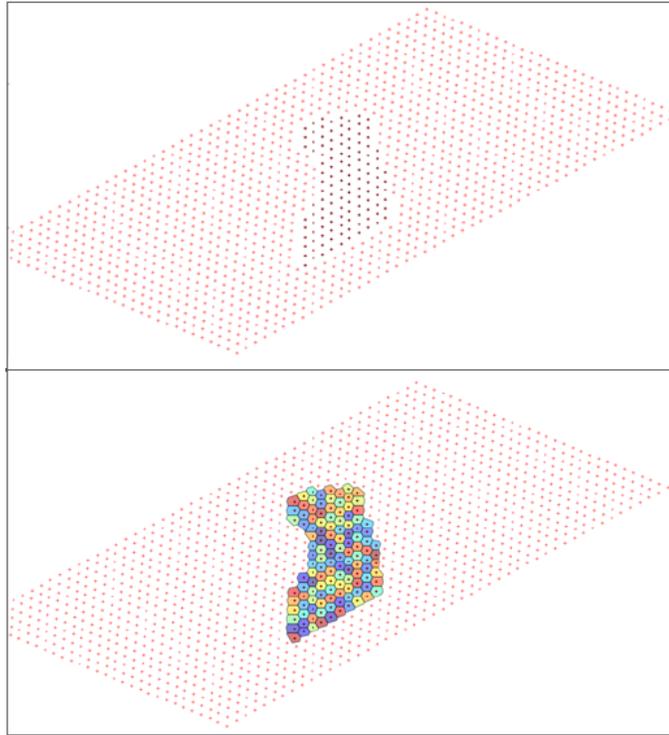


FIGURA 24: ALGORITMO PARA GENERACIÓN DE PUNTOS: MALLA DE PUNTOS EXTENDIDOS Y EJECUCIÓN DE VORONOI. (NAVARRO, 2011)

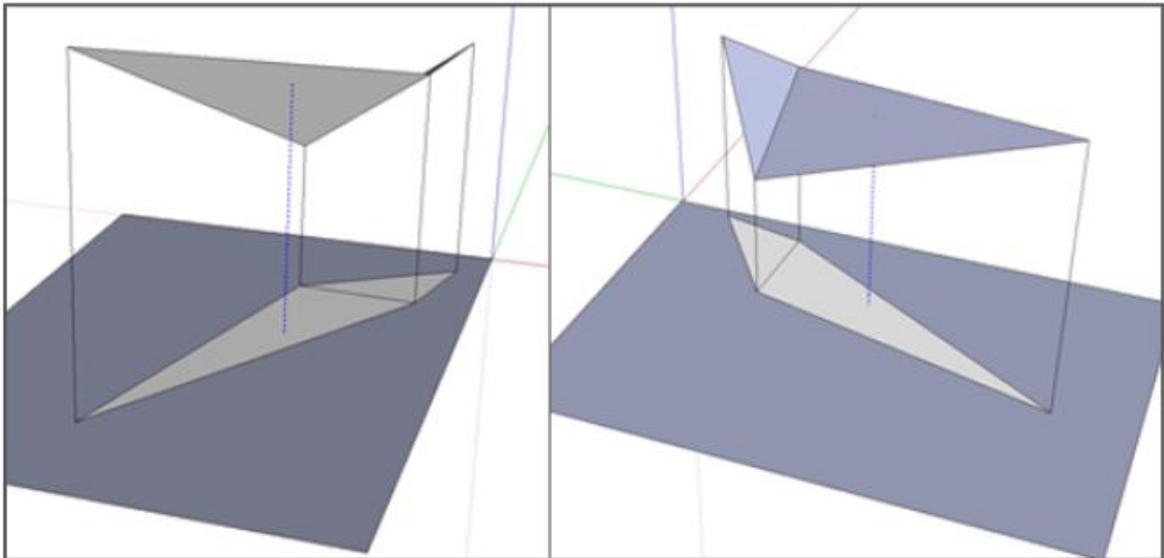


FIGURA 25: PROYECCIÓN DE UN PUNTO A UN PLANO DE TRIANGULACIÓN (NAVARRO, 2011)

### c. Cálculo de columnas in-situ

Para calcular las columnas in-situ en términos de altura, perfiles de leyes y tonelajes se utiliza un algoritmo basado en los centroides de los bloques (Figura 26(b)) y la intersección del área de Voronoi de los puntos de extracción con los bloques del modelo (Figura 26(c)). Este algoritmo se basa en transformar el modelo de bloques a un modelo de columnas que contienen, por altura, las propiedades de los bloques que la conforman. La asignación de propiedades se realiza a través de un balance de masa para las leyes y densidades, mientras que para los atributos como tipos de roca, la asignación se realiza a partir del atributo del bloque que posea mayor proporción en la tajada.

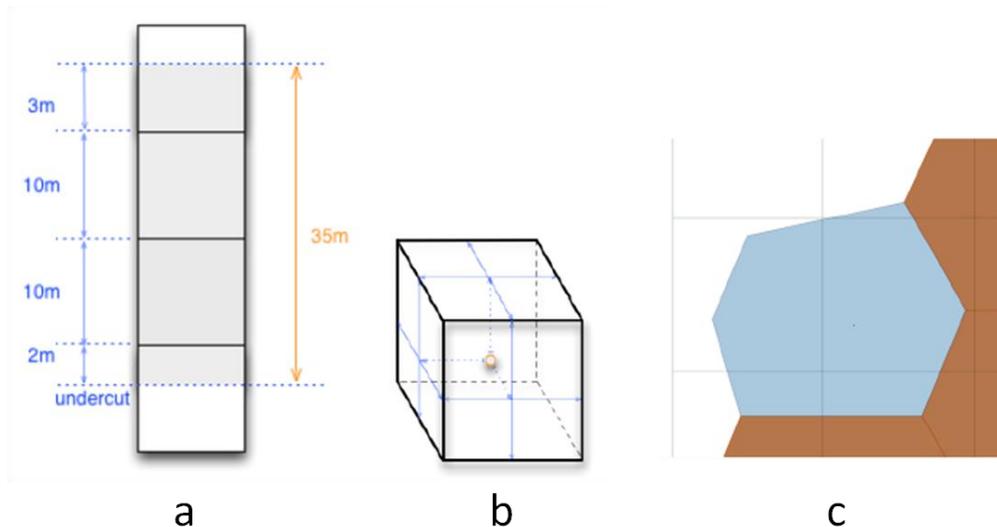


FIGURA 26: A) CÁLCULO ALTURA DE COLUMNA, B) CENTROIDE DE UN BLOQUE, C) ÁREA DE UN PUNTO INTERSECTADA

### d. Gráficos

A partir del cálculo de columnas in-situ, Syscave<sup>®</sup> es capaz de generar gráficos de propiedades in-situ, de extracción y simulados.

- Gráficos in-situ:  
Se utilizan los datos provenientes del modelo de bloques transformado en modelo de columnas, los que incluyen leyes y tonelajes.
- Gráficos de extracción histórica:  
Se utilizan los datos provenientes de la información de extracción histórica de la operación bajo análisis, los que incluyen leyes y dilución. Estos gráficos pueden obtenerse para puntos aislados o grupos de puntos. De esta manera, pueden obtenerse las curvas de dilución para los puntos de extracción. Estas curvas pueden estar en función del porcentaje de columna extraída para puntos aislados o del tiempo para grupos de puntos. Además, la herramienta calcula la curva de dilución acumulada en función del porcentaje de columna extraída o del tiempo (para puntos aislados o grupos de puntos). El porcentaje de dilución acumulado

para un período de tiempo  $t$  determinado ( $\%Dilución\ acumulada_t$ ) se calcula según la siguiente relación:

$$\%Dilución\ acumulada_t = \frac{\sum_{i=1}^t (\%dilución\ observada_i \cdot tonelaje_i)}{\sum_{i=1}^t (tonelaje_i)}$$

ECUACIÓN 17: DILUCIÓN ACUMULADA EN FUNCIÓN DE DILUCIÓN OBSERVADA

Donde  $\%dilución\ observada_i$  y  $tonelaje_i$  son el porcentaje de dilución observada y el tonelaje extraído para el punto de extracción en el período  $i$ , respectivamente. La Figura 27 muestra las curvas de dilución observada y acumulada para un punto del sector Inca Centra Este (ICE) de El Salvador.

- **Gráficos de simulaciones:**

Se utilizan los datos provenientes de los archivos de salida de la herramienta de simulación de flujo gravitacional. Al igual que los gráficos de extracción histórica, pueden visualizarse las leyes en función de la extracción y la altura de columna, y la dilución observada y acumulada en función del tiempo y del porcentaje de columna extraído. De manera de comparar los resultados de la simulación con los datos de extracción histórica.

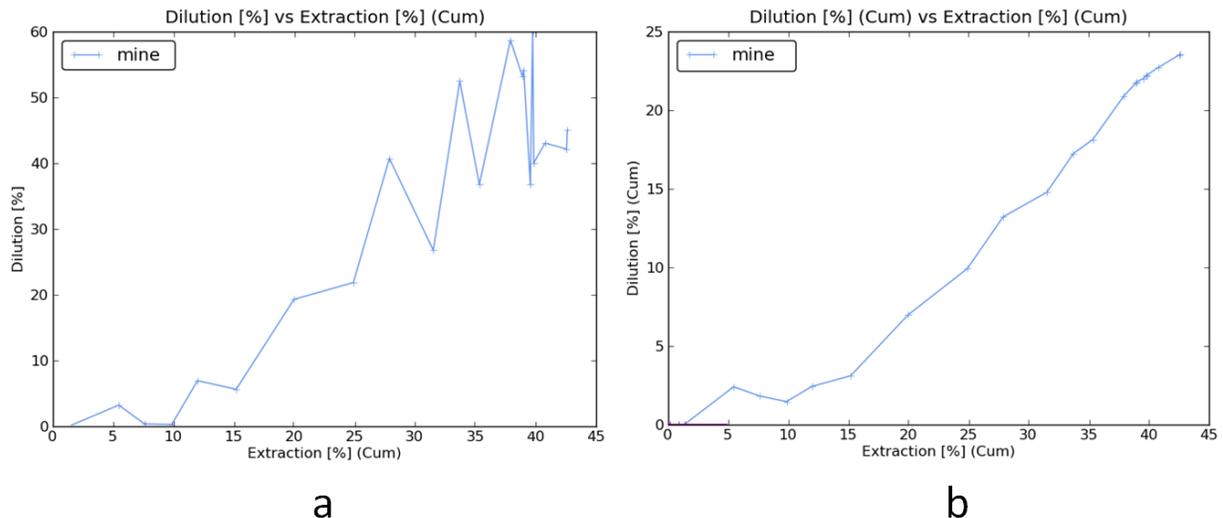


FIGURA 27: CURVAS DE DILUCIÓN PARA PUNTO ICE0311W, DONDE: A) PORCENTAJE DE DILUCIÓN OBSERVADA EN FUNCIÓN DE PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN, B) PORCENTAJE DE DILUCIÓN ACUMULADA EN FUNCIÓN DE PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN

**e. Porcentaje de uniformidad**

Utilizando la información de la extracción histórica y la disposición espacial de los puntos de extracción, Syscave® permite el cálculo, la visualización y exportación del porcentaje de uniformidad de los puntos de extracción del sector bajo análisis basado en el índice de uniformidad de Susaeta (2004). Esto se logra definiendo un radio de búsqueda y un espacio temporal para el cálculo que incluye la fecha de inicio y final además del salto temporal que puede ser de 1 a 3 turnos. La matriz de uniformidad que utiliza el software es fija y se presenta a continuación en la Tabla 12. El cálculo del porcentaje de

uniformidad se realiza para las 3 condiciones de tiraje que contiene la matriz y se realiza en base a la cantidad de toneladas extraídas bajo cada una de ellas por punto de extracción.

TABLA 12: MATRIZ DE UNIFORMIDAD PARA SYSCAVE®

|                             |   | Índice de uniformidad específico |              |              |              |              |
|-----------------------------|---|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             |   | 0 - 0.2                          | 0.2 - 0.4    | 0.4 - 0.6    | 0.6 - 0.8    | 0.8 - 1      |
| Número de vecinos inactivos | 0 | UNIFORME                         | UNIFORME     | UNIFORME     | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME |
|                             | 1 | UNIFORME                         | UNIFORME     | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME |
|                             | 2 | UNIFORME                         | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME | AISLADO      |
|                             | 3 | SEMIUNIFORME                     | SEMIUNIFORME | SEMIUNIFORME | AISLADO      | AISLADO      |
|                             | 4 | SEMIUNIFORME                     | SEMIUNIFORME | AISLADO      | AISLADO      | AISLADO      |
|                             | 5 | AISLADO                          | AISLADO      | AISLADO      | AISLADO      | AISLADO      |
|                             | 6 | AISLADO                          | AISLADO      | AISLADO      | AISLADO      | AISLADO      |

La Figura 28 muestra una vista de la pantalla de Syscave® donde se despliega una planta con el porcentaje de uniformidad del sector ICE de El Salvador, además se aprecian las curvas de dilución observada de extracción histórica y simulada de un punto de extracción del sector, y el gráfico de leyes in-situ y extraídas en función de la altura de columna del mismo punto.

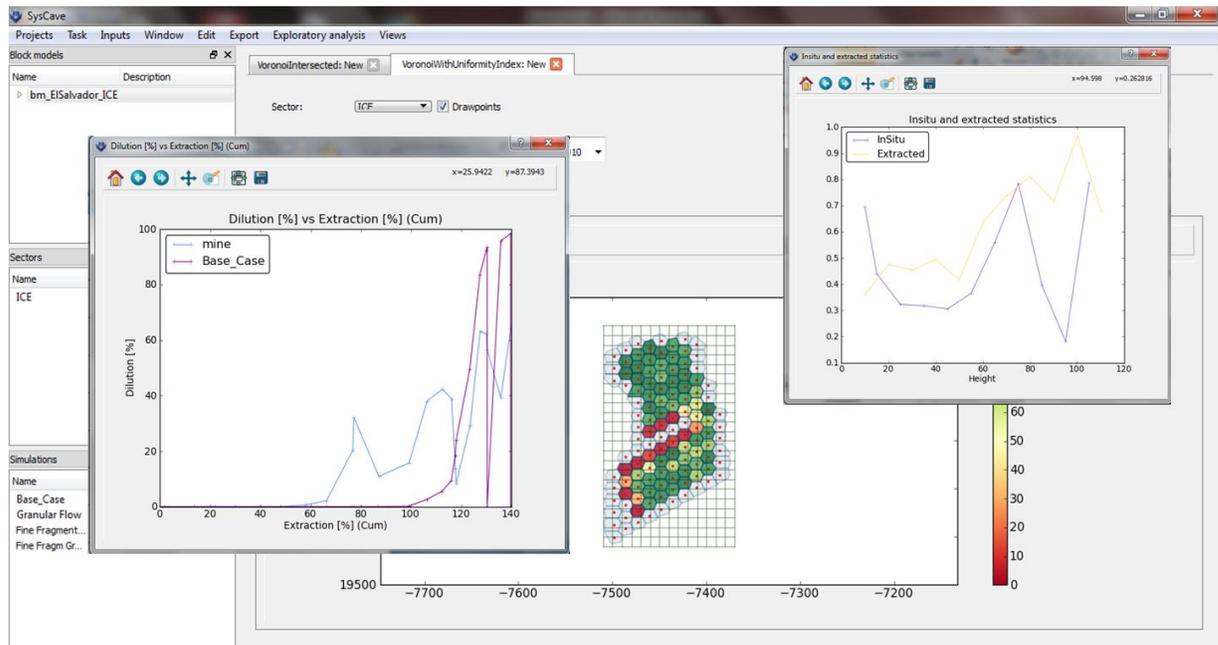


FIGURA 28: PANTALLA DE TRABAJO DE SYSCAVE®

# CAPÍTULO 5

---

## ESTUDIO DE MECANISMOS DE ENTRADA DE LA DILUCIÓN

El presente capítulo contiene un análisis de los datos de minas correspondientes a la base de datos de dilución, cuya formulación se especifica en el Capítulo 4, con el objetivo de formular hipótesis acerca de los mecanismos de entrada de dilución en cada sector productivo. El análisis se fundamenta en la consideración de las siguientes variables:

- Alturas de columna in-situ (hasta el material diluyente).
- Uniformidad de la extracción.
- Secuencia de extracción.

Y consiste en observar sector por sector el punto de entrada de dilución (definido a través de un criterio generalizado) de los puntos de extracción en conjunto con las variables descritas. Para el cálculo de porcentajes de uniformidad, alturas de columna y curvas de dilución de los puntos, se utiliza la herramienta Syscave<sup>®</sup>, cuya formulación y metodología de cálculo se especifica en el Capítulo 4.

### 5.1 DEFINICIÓN DEL PUNTO DE ENTRADA DE DILUCIÓN

La primera etapa del estudio de los mecanismos de entrada de dilución consiste en la definición de un criterio generalizado para la determinación del punto (o porcentaje) de entrada de dilución en un punto de extracción. Para esto, se analizan las curvas de dilución de todos los puntos correspondientes a la base de datos de dilución que poseen dilución observada, los cuales corresponden a 1674.

Del análisis de las curvas de dilución observada en función del porcentaje de columna in-situ extraído, es posible apreciar que éstas poseen comportamientos que en general difieren del perfil teórico de crecimiento continuo a partir del primer ingreso y tienden a representar oscilaciones que pueden llegar a cero más de una vez (comportamiento en forma de pulso). Es posible agrupar los comportamientos generales de las curvas de dilución observada de los puntos bajo el análisis en dos, estos son:

- Comportamiento en forma de pulso:  
Corresponde a aquellas curvas que poseen más de un cero, es decir, que el porcentaje de dilución observado en el punto de extracción vuelve a ser cero por lo menos una vez después del primer ingreso de la dilución.

- **Comportamiento de ingreso continuo:**  
Corresponde a aquellas curvas en que el porcentaje de dilución observado no vuelve a ser cero desde el primer ingreso. Es importante destacar que esto no necesariamente significa que el porcentaje de dilución observado en función del porcentaje de columna in-situ extraído sea creciente.

La Figura 29 ilustra las curvas de dilución observada de los puntos A69W50 e ICE0115E, del cluster de dilución LHD de Andina y del sector ICE de El Salvador, respectivamente. La curva del punto A69W50 corresponde a un comportamiento en forma de pulso, mientras que la del punto ICE0115E corresponde a un comportamiento de ingreso continuo.

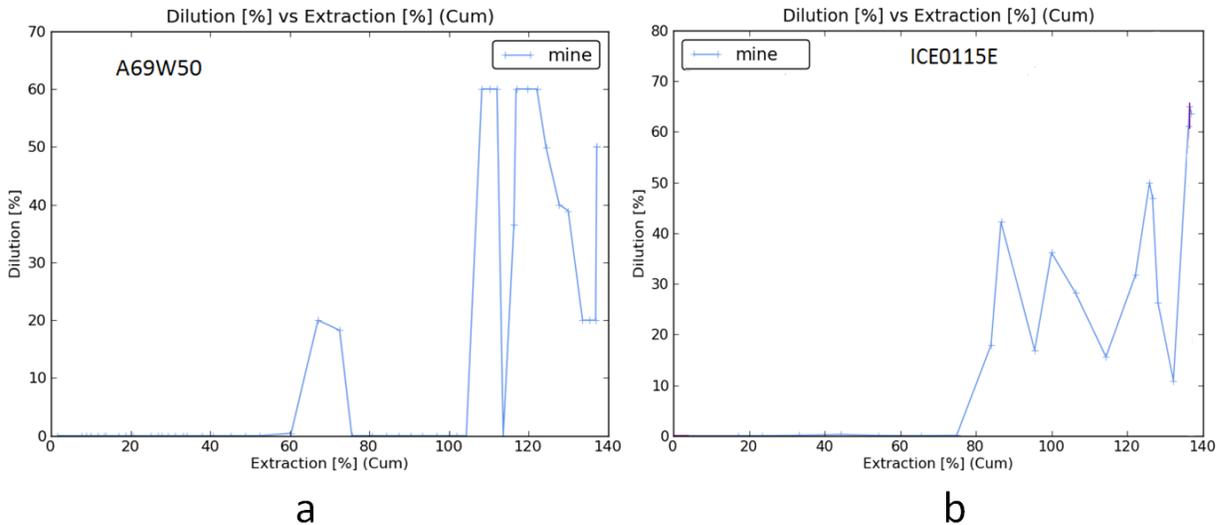


FIGURA 29: CURVAS DE DILUCIÓN OBSERVADA DE DOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN: A) COMPORTAMIENTO EN FORMA DE PULSO, Y B) COMPORTAMIENTO DE INGRESO CONTINUO

En términos generales, aproximadamente la mitad de las curvas de dilución de los puntos pertenecientes a la base de datos posee un comportamiento en forma de pulso, lo que implica que el criterio generalizado para establecer el punto de entrada de dilución debe considerar este fenómeno. La Tabla 13 resume el conteo de comportamientos de las curvas pertenecientes a la base de datos de dilución.

TABLA 13: CONTEO DE COMPORTAMIENTOS DE CURVAS DE DILUCIÓN OBSERVADA

| División     | Sector            | Marcador geológico | N° Puntos con registro de marcador | Curvas con comportamiento de pulso |           |
|--------------|-------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
|              |                   |                    |                                    | N°                                 | (%)       |
| El Salvador  | ICE               | Limonita           | 97                                 | 47                                 | 48        |
|              | ICW               |                    | 289                                | 226                                | 78        |
|              | IN                |                    | 537                                | 176                                | 33        |
|              | IW                |                    | 170                                | 125                                | 74        |
| Andina       | Cluster LHD       | Riolita            | 150                                | 60                                 | 40        |
|              |                   | Quebrado           | 137                                | 93                                 | 68        |
|              | Cluster Parrillas | Riolita            | 147                                | 68                                 | 46        |
|              |                   | Quebrado           | 147                                | 63                                 | 43        |
| <b>Total</b> |                   |                    | <b>1674</b>                        | <b>858</b>                         | <b>51</b> |

El hecho de que existan distintos tipos de pulso dentro de las curvas con comportamiento en forma de pulso obliga a razonar cuándo resulta significativo un pulso y cuándo representa sólo un “ruido” en la curva.

La Figura 30a ilustra las curvas de dilución observada de los puntos IN0527E y A69W51 correspondientes al sector ICE de El Salvador y el cluster de dilución LHD de Andina, respectivamente, mientras que la Figura 30b muestra las curvas de dilución acumulada para los mismos puntos de extracción.

Las curvas de dilución observada de ambos puntos poseen un comportamiento de pulso. Sin embargo, la curva del punto IN0527E posee un peak de 8.7% de dilución observada cuando se ha extraído el 150% de la columna in-situ y que representa un 0.65% de dilución acumulada, lo que podría ser perfectamente interpretado como un ruido en la curva e implicaría que la dilución no ingresa de manera significativa en el punto. Mientras que, por otra parte, la curva de dilución observada del punto A69W51 posee una primera entrada que alcanza el 10% de dilución observada al 63% de columna extraída que se mantiene por varios períodos y luego un segundo pulso cerca del 100% de columna extraída que alcanza un 40%. El primer pulso representa cerca de un 1.5% de dilución acumulada, mientras que el segundo más de un 4%. En este caso, podría decirse que los pulsos son significativos en términos de la cantidad acumulada de dilución que representan, por lo que la dilución entra de manera significativa en el punto A69W51.

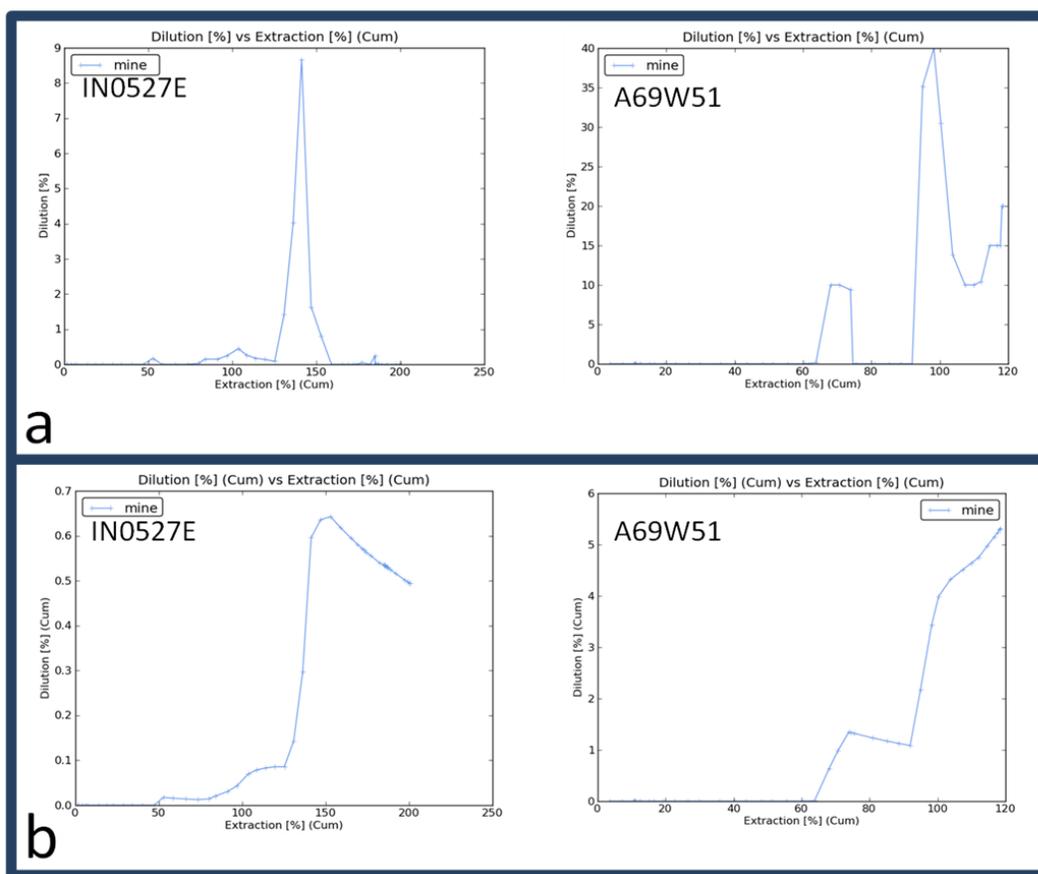


FIGURA 30: A) CURVAS DE DILUCIÓN OBSERVADA DE DOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN, B) CURVAS DE DILUCIÓN ACUMULADA DE LOS MISMOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN

De esta manera, cobra sentido generar un criterio para definir el punto de entrada de dilución basado en la curva de dilución acumulada de los puntos de extracción para este trabajo de tesis.

Una vez que se define utilizar la curva de dilución acumulada, la segunda etapa consiste en definir a qué porcentaje de dilución acumulada se declara la entrada de dilución de manera significativa. La Figura 31 ilustra la entrada de dilución definida para un punto de extracción al 3% y al 5%.

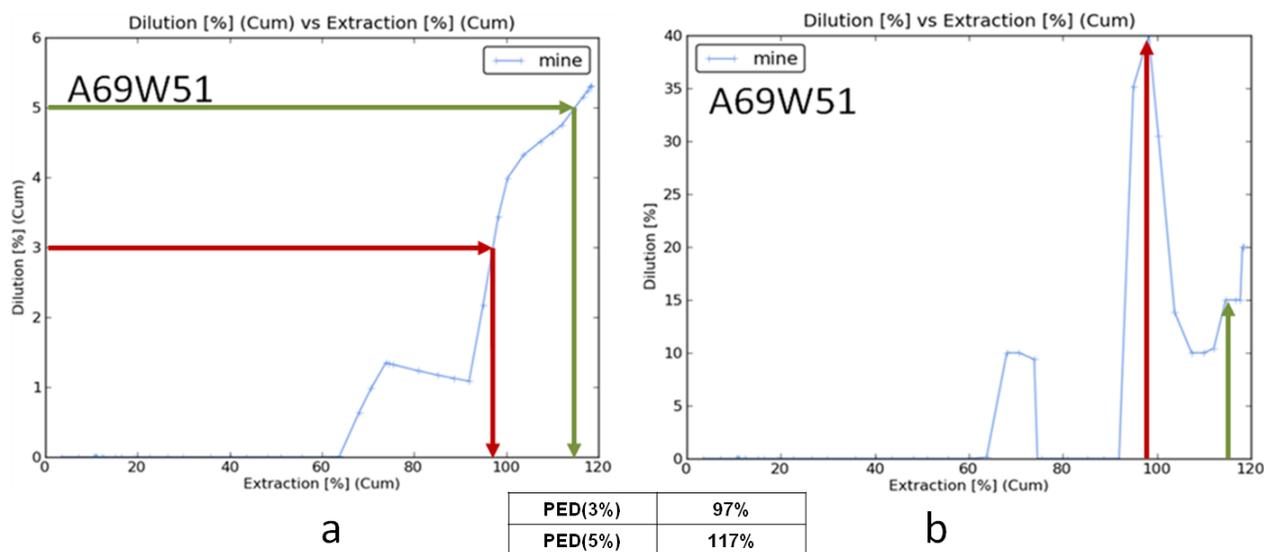


FIGURA 31: ILUSTRACIÓN DE PED DECLARADO AL 3% Y 5% DE LA CURVA DE DILUCIÓN ACUMULADA PARA UN PUNTO DE EXTRACCIÓN, DONDE SE MUESTRA: A) CURVA DE DILUCIÓN ACUMULADA, Y B) CURVA DE DILUCIÓN OBSERVADA

De manera de definir el porcentaje al cual se declarará la entrada de dilución para el presente trabajo de tesis se calcula la cantidad de puntos de extracción con entrada de dilución declarada para el criterio acumulado al 3%, 5% y 10%. La Tabla 14 muestra los resultados para todos los sectores pertenecientes a la base de datos de dilución.

TABLA 14: NÚMERO DE PUNTOS CON DILUCIÓN DECLARADA CON CRITERIO ACUMULADO

| División    | Sector            | Marcador geológico | Número de puntos con entrada de dilución declarada |         |          |
|-------------|-------------------|--------------------|--|---------|----------|
|             |                   |                    | PED(3%)  | PED(5%) | PED(10%) |
| El Salvador | ICE               | Limonita           | 58   | 55      | 49       |
|             | ICW               | Limonita           | 167  | 143     | 68       |
|             | IN                | Limonita           | 361  | 329     | 262      |
|             | IW                | Limonita           | 136  | 117     | 66       |
| Andina      | Cluster LHD       | Quebrado           | 53   | 37      | 17       |
|             | Cluster LHD       | Riolita            | 87   | 49      | 5        |
|             | Cluster Parrillas | Quebrado           | 137  | 127     | 98       |
|             | Cluster Parrillas | Riolita            | 120  | 92      | 52       |

Es posible apreciar que el criterio acumulado al 3% (PED(3%)) representa un volumen robusto de datos eliminando aquellas curvas sin entrada de dilución significativa,

mientras que los criterios del 5% y 10% generan un pérdida de información. De esta manera, se decide utilizar el criterio acumulado al 3% para declarar el porcentaje de entrada de dilución en un punto de extracción (PED(3%)).

Para términos prácticos, debido que en Andina existen 2 tipos de marcador geológico (quebrado y riolita), el punto de entrada de dilución se calcula por separado para ambos. Así, se definen:

- PEQ(3%): Punto de entrada de dilución (quebrado) declarado al 3% del contenido acumulado de material quebrado.
- PER(3%): Punto de entrada de dilución (riolita) declarado al 3% del contenido acumulado de riolita.

## 5.2 ANÁLISIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN EL SALVADOR

La base de datos de dilución para la División El Salvador se compone de la extracción histórica desde julio de 1994 hasta mayo de 2011 de los sectores Inca Central Este (ICE), Inca Central Oeste (ICW), Inca Norte (IN) e Inca Oeste (IW). Las estadísticas de extracción de tonelajes y leyes para los sectores de El Salvador se presentan en la Tabla 10. La Figura 32 ilustra la configuración en planta de los sectores productivos de la base de datos de El Salvador con sus correspondientes cotas de nivel de hundimiento (UCL) y en la Figura 33 se observa una vista isométrica de los sectores productivos con las superficies de contacto entre material in-situ y quebrado coloreadas según el sector correspondiente.

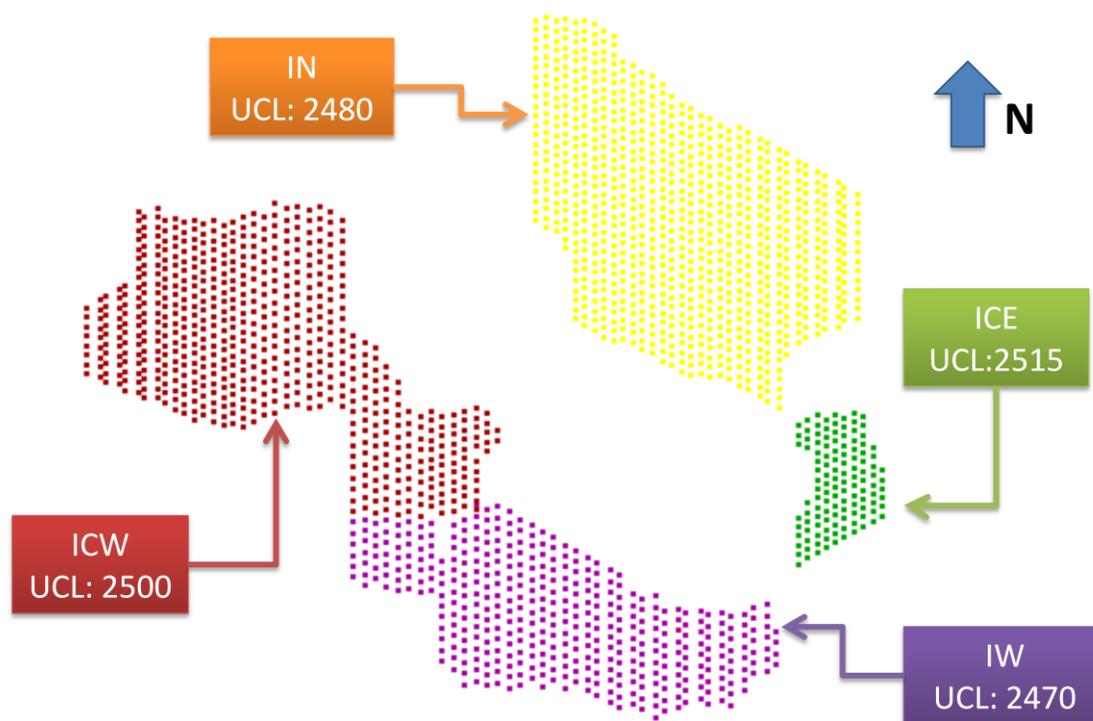


FIGURA 32: VISTA EN PLANTA SECTORES DE EL SALVADOR

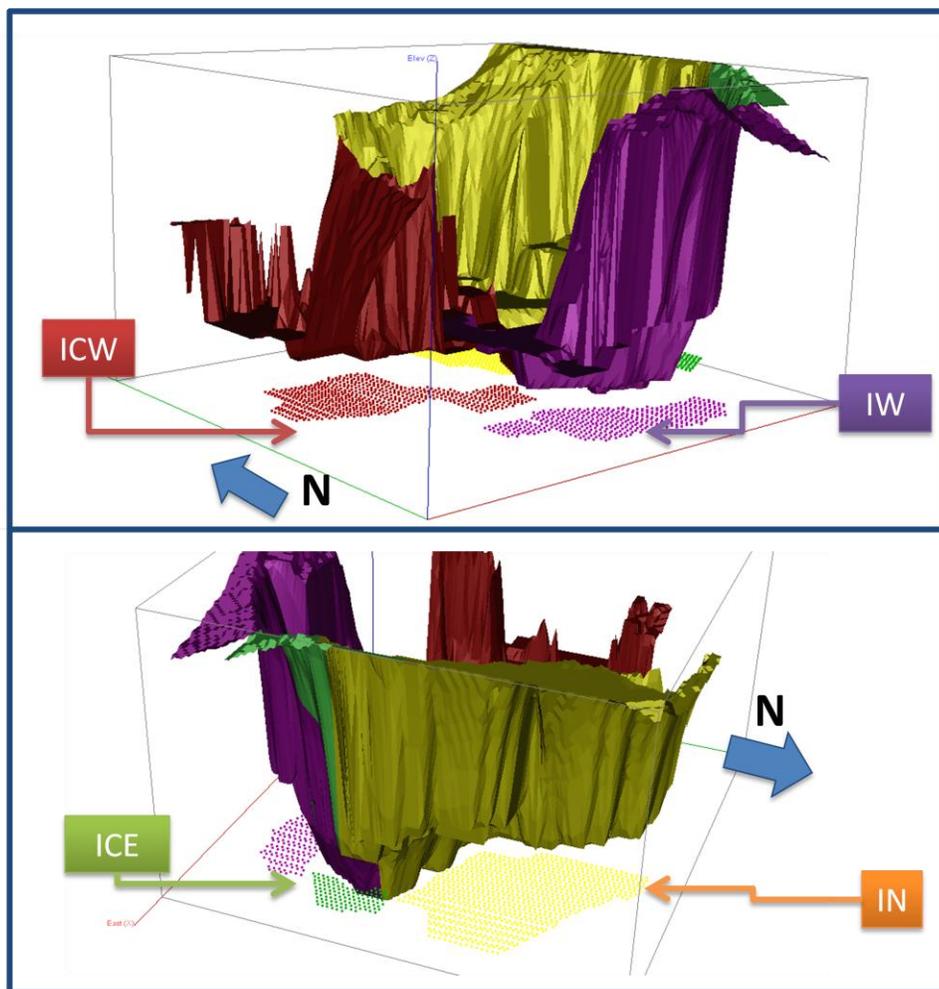


FIGURA 33: VISTA ISOMÉTRICA DE SUPERFICIES DE CONTACTO ENTRE MATERIAL IN-SITU Y QUEBRADO PARA SECTORES DE EL SALVADOR

Los 4 sectores de El Salvador poseen diferentes condiciones de borde en lo que respecta a las alturas de columna y la secuencia de extracción con respecto a la ubicación del material diluyente que siguen, lo que repercute en diferentes perfiles de entrada de la dilución a nivel de plan de producción y de puntos de extracción. De esta manera, se hace necesario un análisis por sector de la entrada de dilución.

### 5.2.1 Inca Central Este (ICE)

El sector Inca Central Este cuenta con 108 puntos con extracción desde junio de 2003 hasta octubre de 2010. La Figura 34 ilustra el perfil de toneladas y leyes de cobre extraídas del sector a lo largo de su vida productiva.

El perfil de alturas de columna in-situ de muestra en una vista en planta en la Figura 35a. Las alturas de columna in-situ van desde 21(m) hasta más de 630 (m) desde el noroeste al sureste del sector, respectivamente. La secuencia de extracción (Figura 35b) avanza desde el noreste hasta el sureste del sector, es decir, desde las alturas de columna menores hacia las mayores. De esta forma, la secuencia de extracción en el sector ICE

parte desde lo más cercano a la fuente de dilución y se va alejando a medida que avanza hacia el sureste.

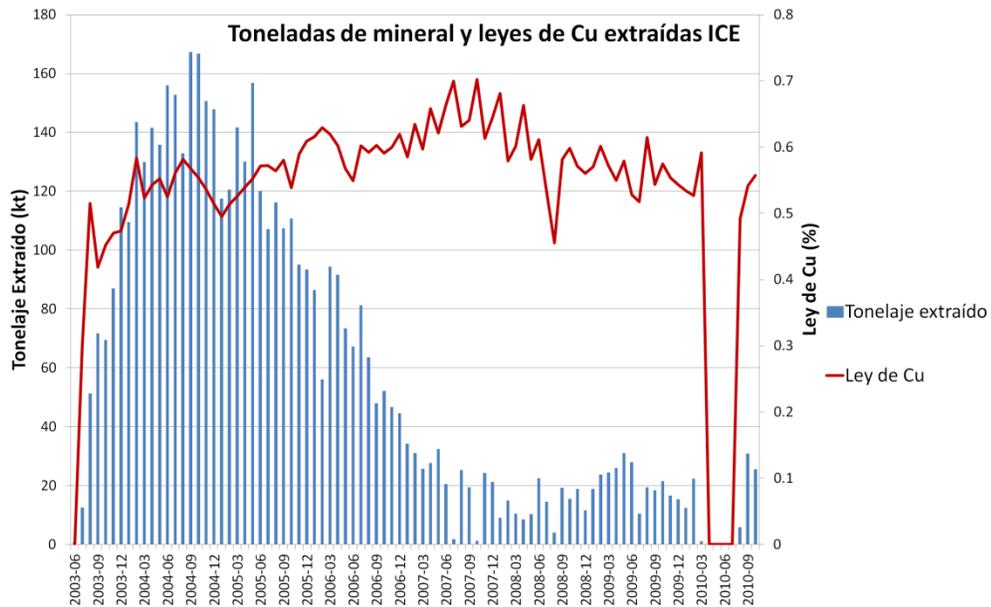


FIGURA 34: TONELAJE Y LEYES DE CU EXTRAÍDAS ICE

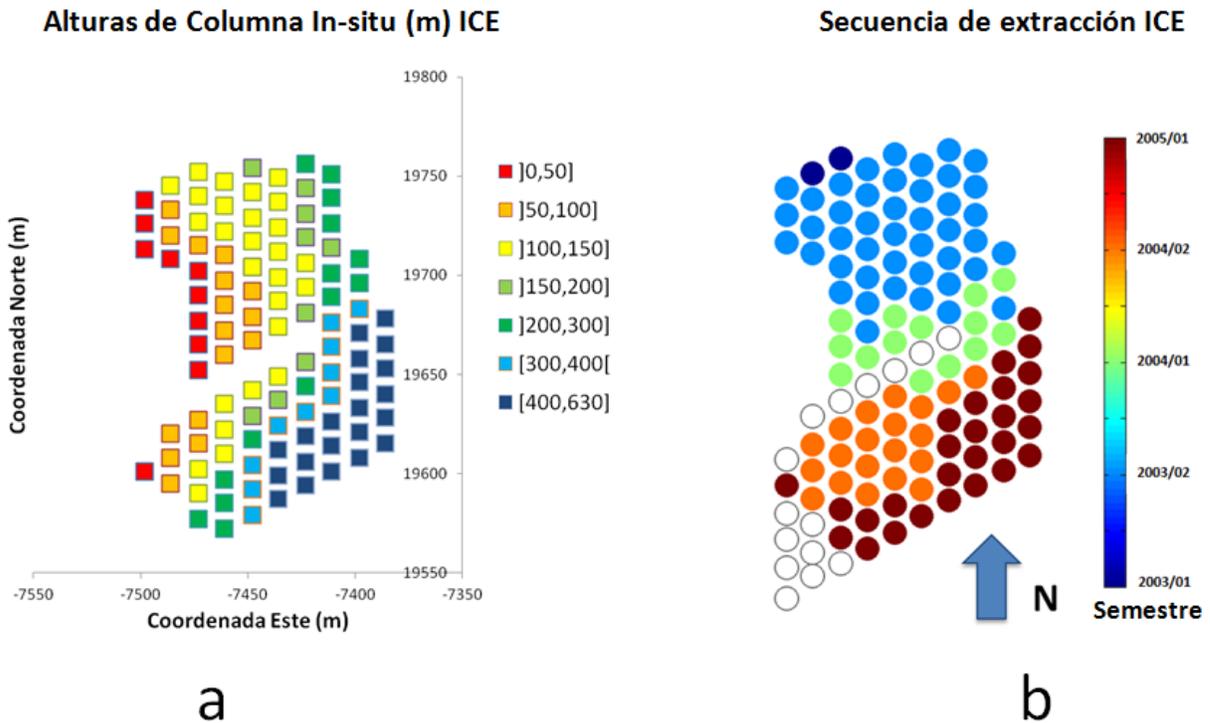


FIGURA 35: VISTAS EN PLANTA DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE ICE, DONDE SE MUESTRA: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

El contenido de dilución extraída en el sector se presenta en la Figura 36 y en la Tabla 15. Es posible apreciar que la dilución comienza a aparecer en octubre de 2003, es

decir, 4 meses después de que comienza la extracción y llega a representar sobre el 25% del contenido extraído en 2006.

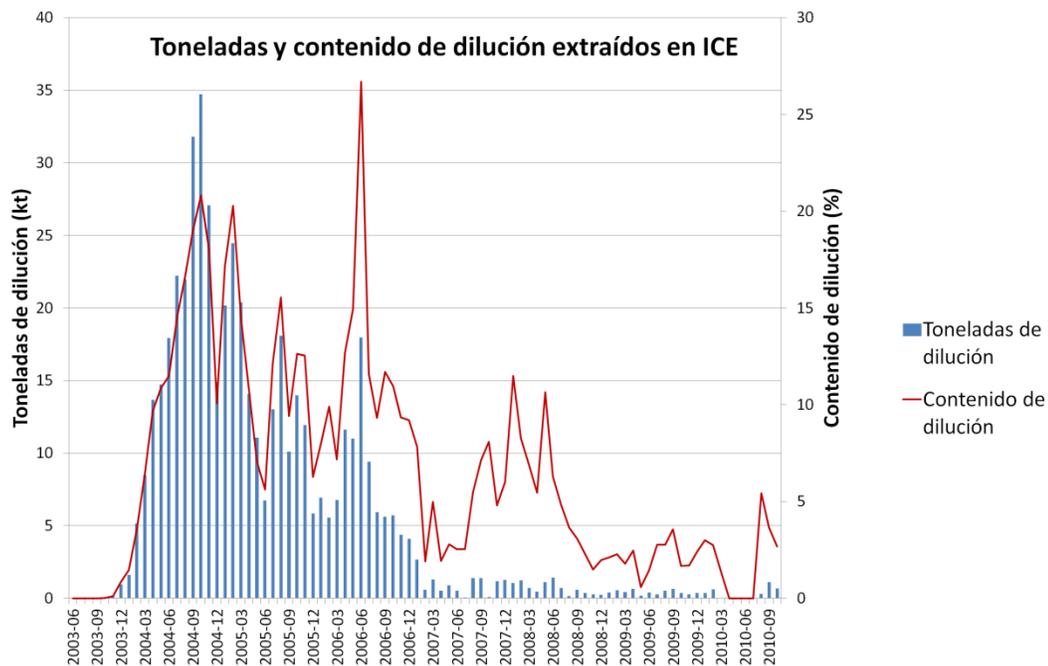


FIGURA 36: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS ICE

TABLA 15: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA ICE

| Estadísticas de dilución extraída ICE |              |                                 |            |                                    |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------------|------------|------------------------------------|
| Número de Puntos                      |              | Dilución extraída (kt, mensual) |            | Entrada de dilución sector (fecha) |
| Con Extracción                        | Con dilución | Media                           | Desv. Est. |                                    |
| 108                                   | 89           | 5.7                             | 8.1        | oct-03                             |
| Área (m <sup>2</sup> )                | 18252        | 15041                           |            |                                    |

La uniformidad con la cual se realiza la extracción en el sector ICE se presenta en una vista en planta en la Figura 37. En ella se puede apreciar que la extracción en la mayoría de los puntos se realiza de manera uniforme, y aquellos puntos que poseen baja uniformidad son los vecinos de los piques de vaciado (OP). La Figura 38 muestra un histograma y las estadísticas básicas del porcentaje de uniformidad en tiraje uniforme para los puntos del interior del ICE (los cuales no tienen como vecinos a los puntos de vaciado). Las estadísticas indican que el 88% del tonelaje de estos puntos fue extraído de manera uniforme.

### Porcentaje de Uniformidad (Uniforme) ICE

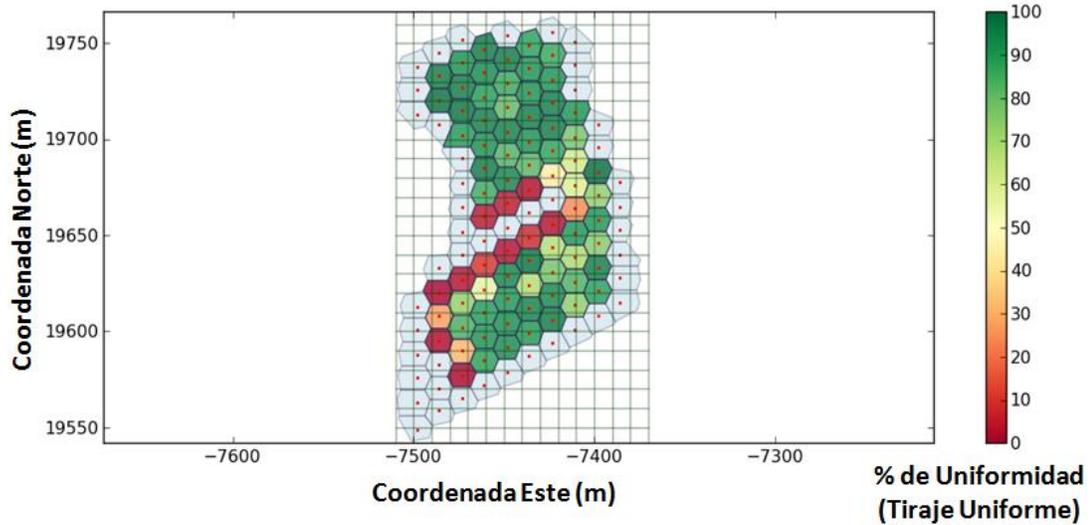


FIGURA 37: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) ICE

### Histograma de Porcentaje de Uniformidad (Tiraje Uniforme) para ICE (puntos interiores)

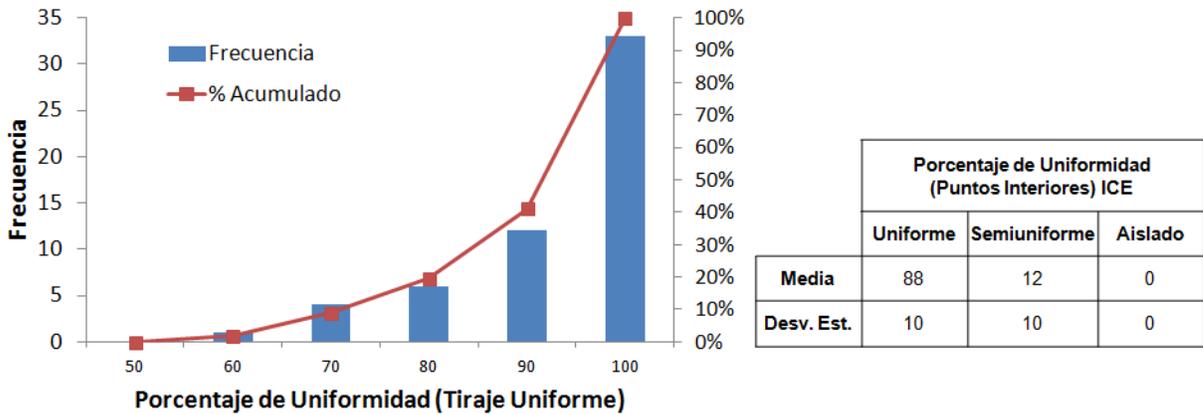


FIGURA 38: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA PUNTOS INTERIORES DE ICE

La Figura 39 corresponde a una vista en planta del punto de entrada de dilución declarado al 3% del contenido de dilución acumulado (PED(3%)). Es posible notar que existen 2 zonas respecto de la entrada de dilución, al norte y al sur de los puntos de vaciado (OP). En la zona norte, los porcentajes de entrada de dilución van del 40% al 60% aproximadamente y decrecen a cerca del 20% cerca de la zona de los puntos de vaciado. Esto sugiere que a medida que la secuencia avanza hacia el sur, la entrada de dilución es cada vez más temprana, lo que indica un arrastre lateral de la dilución de norte a sur. En la zona sur, los puntos de extracción no poseen entrada de dilución declarada, lo cual probablemente se debe a la presencia de una especie de pilar de roca quebrada que actúa como una barrera de la dilución proveniente del norte del sector. Con respecto a los puntos vecinos a los piques de vaciado, probablemente la entrada temprana de la dilución que presentan se debe a la baja uniformidad con que fue realizada su extracción debido a su cercanía a los puntos de vaciado. El PED(3%) para

los puntos de extracción del ICE tiene una media de 57% con una desviación estándar de 54%.

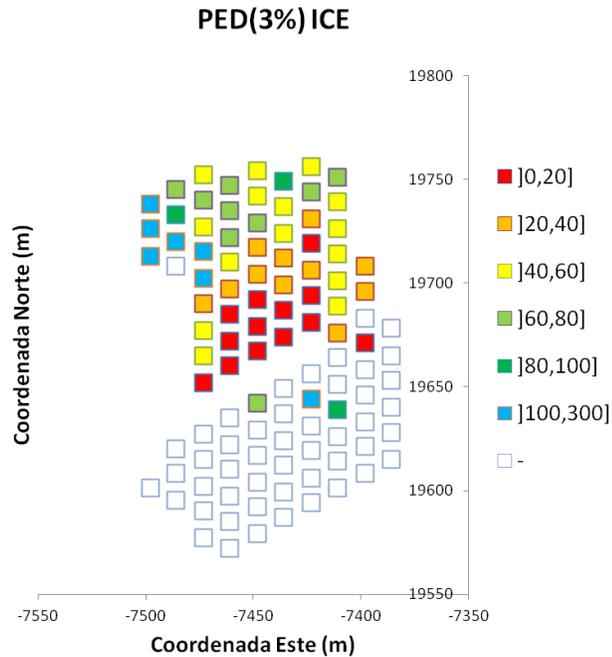


FIGURA 39: VISTA EN PLANTA PED(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE ICE

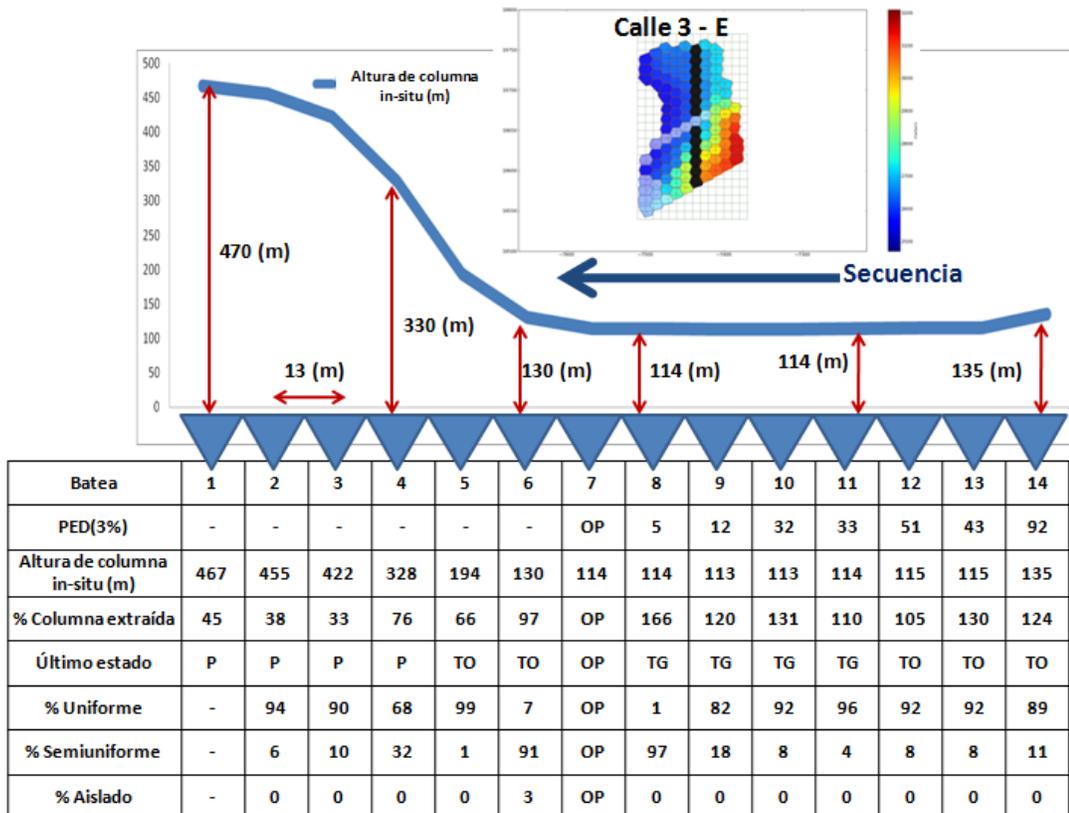


FIGURA 40: PERFIL DE CALLE 3-E ICE. EL ESTADO DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN ES: P: EN PRODUCCIÓN; TO: TERMINADO POR RAZONES OPERACIONALES; OP: PIQUE DE VACIADO; TG: TERMINADO POR RAZONES GEOMECÁNICAS

La Figura 40 ilustra un ejemplo del comportamiento de la dilución para la calle 3-E del sector ICE. Es posible notar que para el sector, parece no existir una relación directa entre el porcentaje de uniformidad y el punto de entrada de dilución para todas las alturas de columna (Figura 41). En el caso de este sector, los factores que predominan en el comportamiento de la entrada de dilución son la dirección de la secuencia con respecto a las alturas de columna y la existencia de un pilar de roca quebrada que actúa como barrera de dilución.

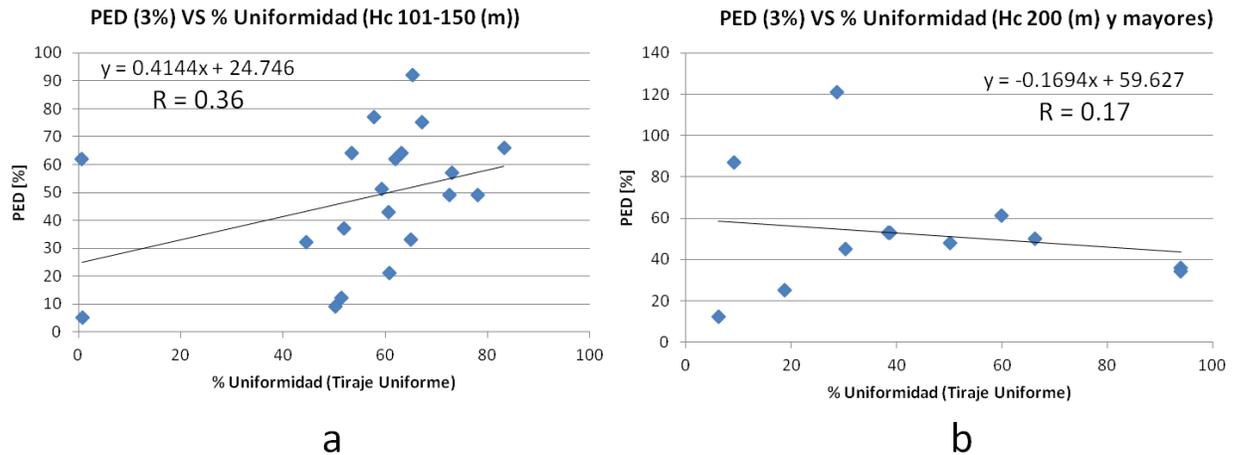


FIGURA 41: ICE: PED(3%) V/S PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU ENTRE 101 Y 150 (M), Y B) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU DE 200 (M) Y MAYORES

La Figura 42 muestra las toneladas y contenido de dilución extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PED (3%)). Es posible apreciar el perfil de dilución extraída, tanto en toneladas como en contenido, sólo difieren al final de la vida del sector con la suma total extraída que se indica en la Figura 36. De esta forma, tomando sólo los puntos con entrada de dilución declarada, la entrada de dilución a nivel de plan de producción también ocurre en octubre de 2003 y llega a representar un contenido sobre el 25% en 2006.

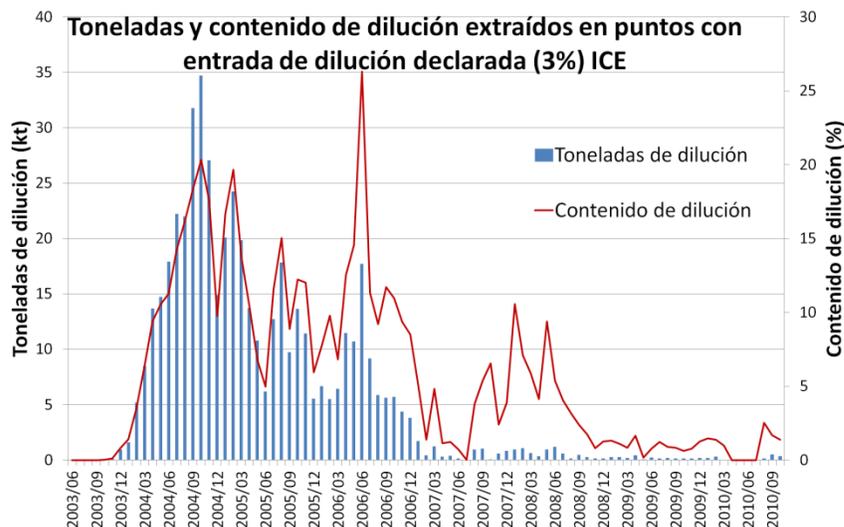


FIGURA 42: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO ICE

## 5.2.2 Inca Central Oeste (ICW)

El sector Inca Central Oeste (ICW) contiene 471 puntos con extracción entre mayo de 2000 y mayo de 2011. Las estadísticas de extracción en términos de leyes de cobre y tonelaje extraído del sector se presentan en la Tabla 10 y en la Figura 43.

El perfil de alturas de columna in-situ se muestra en una vista en planta en la Figura 44a. La gran mayoría de los puntos de extracción en el sector posee alturas de columna bajo 220 (m). La secuencia de extracción del sector (Figura 44b) comienza en el sureste y avanza hacia el noroeste. Comparativamente, el ICW presenta una mayor uniformidad en cuanto a las alturas de columna que va enfrentando la secuencia de extracción en su dirección de avance que en el ICE. Pueden observarse 3 zonas de alturas de columna desde el sureste hacia el noroeste, la primera (zona 1) definida por los primeros puntos abiertos con alturas de columna bajo 150 (m), la segunda (zona 2) definida por los puntos que forman una especie de cintura en el layout del sector con alturas de columna sobre 150 (m) hasta las mayores sobre 300 (m), y finalmente la tercera (zona 3) con alturas de columna desde 100 (m) hasta 300 (m) (Figura 45).

La información de la extracción de dilución en el sector se muestra en la Figura 46 y en la Tabla 16. La entrada de dilución a escala de plan de producción ocurre en mayo de 2000, es decir, el mismo mes en que comienza la extracción del sector. El contenido de dilución disminuye abruptamente luego de la entrada de ésta, esto se debe a que la primera dilución observada corresponde a los puntos de extracción de columna de extracción bajo 50 (m) al comienzo de la secuencia. Luego tiene un peak sobre el 16% durante el año 2003.

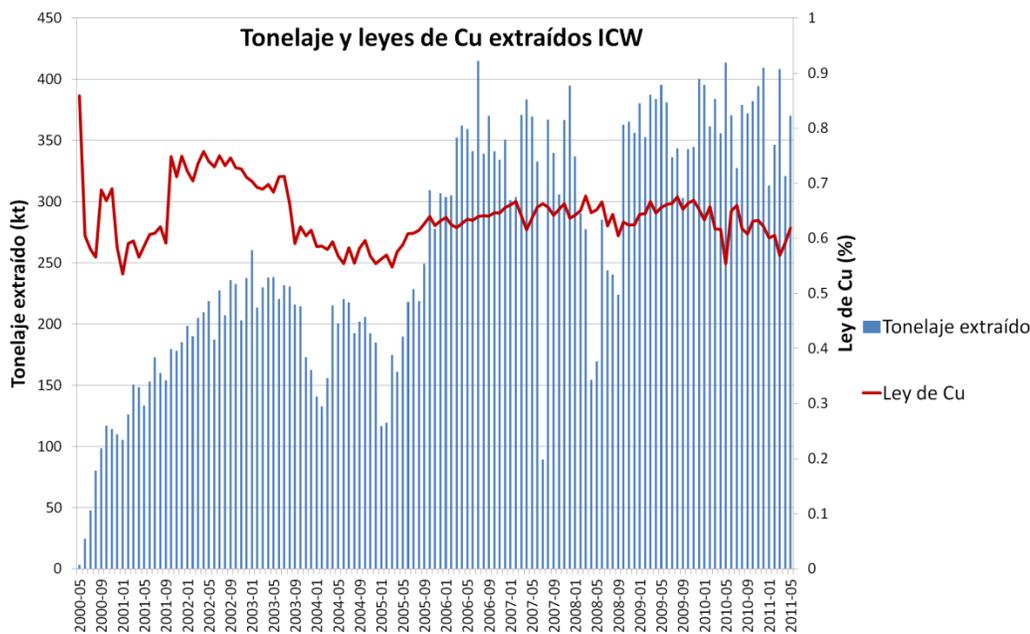


FIGURA 43: TONELAJE Y LEYES DE COBRE EXTRAÍDOS ICW

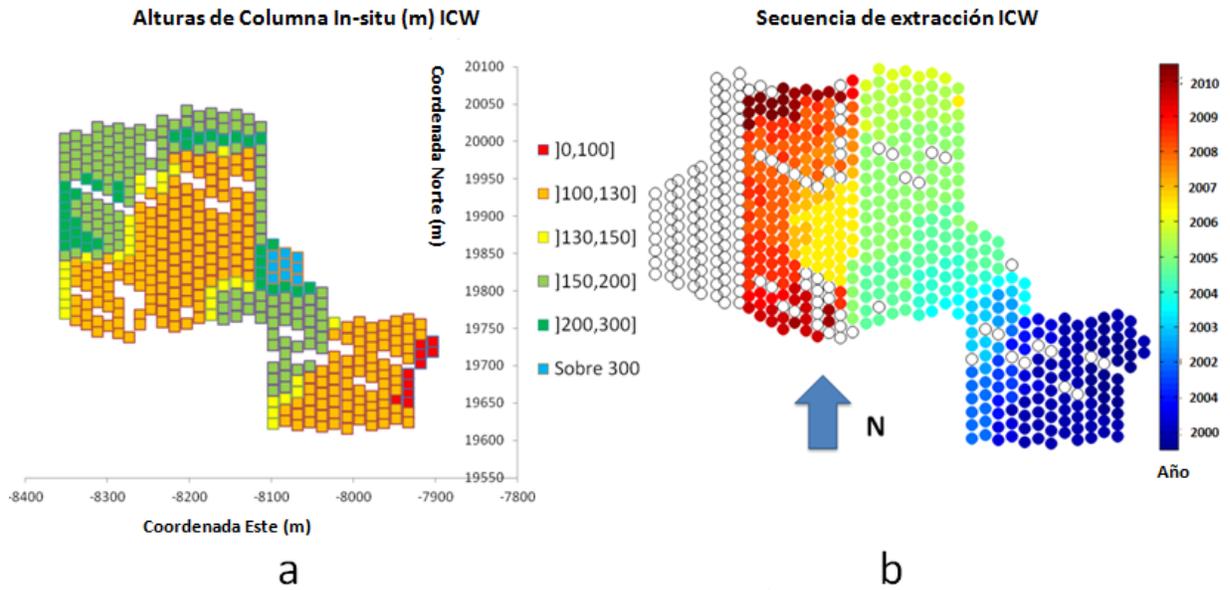


FIGURA 44: VISTAS EN PLANTA DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE ICW, DONDE SE MUESTRAN: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

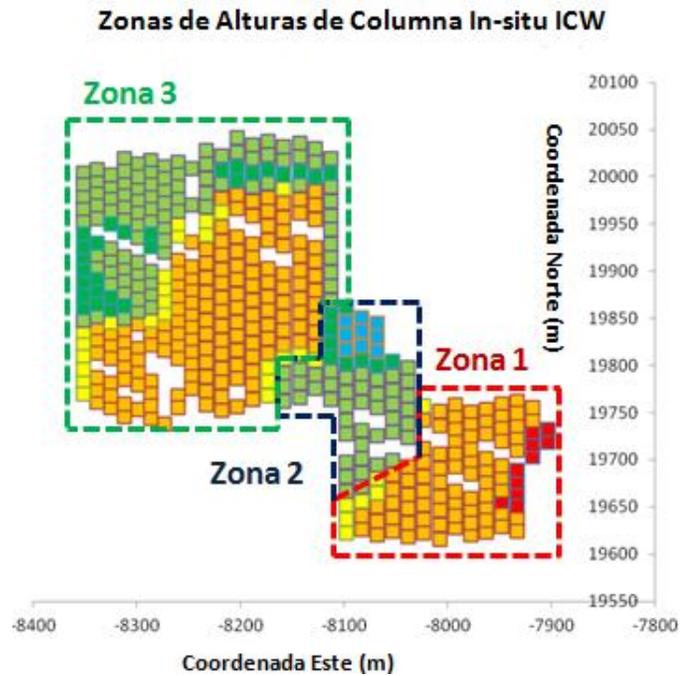


FIGURA 45: ZONAS DE ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU ICW

TABLA 16: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA ICW

| Estadísticas de dilución extraída ICW |                                 |              |                                    |      |        |
|---------------------------------------|---------------------------------|--------------|------------------------------------|------|--------|
| Número de Puntos                      | Dilución extraída (kt, mensual) |              | Entrada de dilución sector (fecha) |      |        |
|                                       | Con Extracción                  | Con dilución |                                    |      | Media  |
|                                       | 471                             | 275          | 14.9                               | 14.2 | May-00 |
| Área (m <sup>2</sup> )                | 79599                           | 46475        |                                    |      |        |

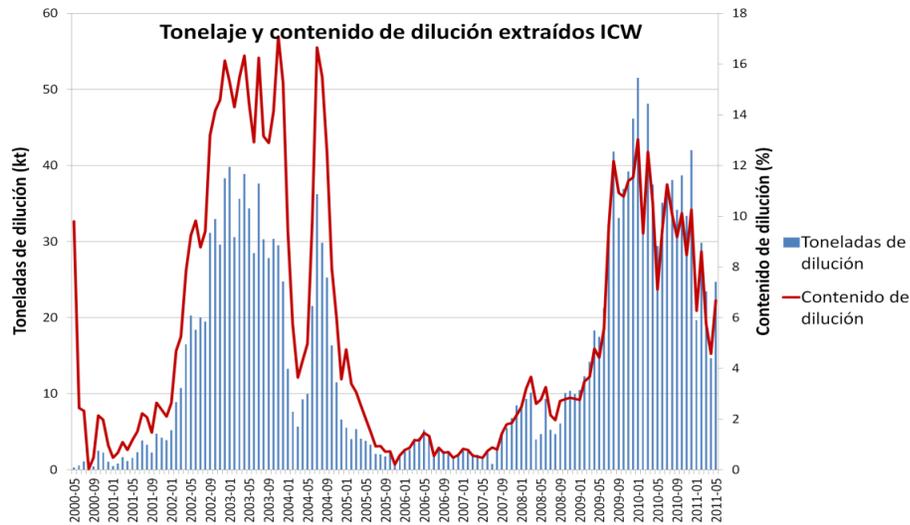


FIGURA 46: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS ICW

El porcentaje de uniformidad del sector se muestra en una vista en planta en la Figura 47. Es posible apreciar que los puntos del ICW fueron extraídos con un alto porcentaje de uniformidad, aquellos puntos que poseen un porcentaje de uniformidad bajo corresponden a los vecinos de piques de traspaso (OP). La Figura 48 muestra el histograma y las estadísticas básicas del porcentaje de uniformidad para los puntos interiores del sector. Estas indican que el 88% del tonelaje extraído en el sector se extrajo de manera uniforme.

### Porcentaje de Uniformidad (Uniforme) ICW

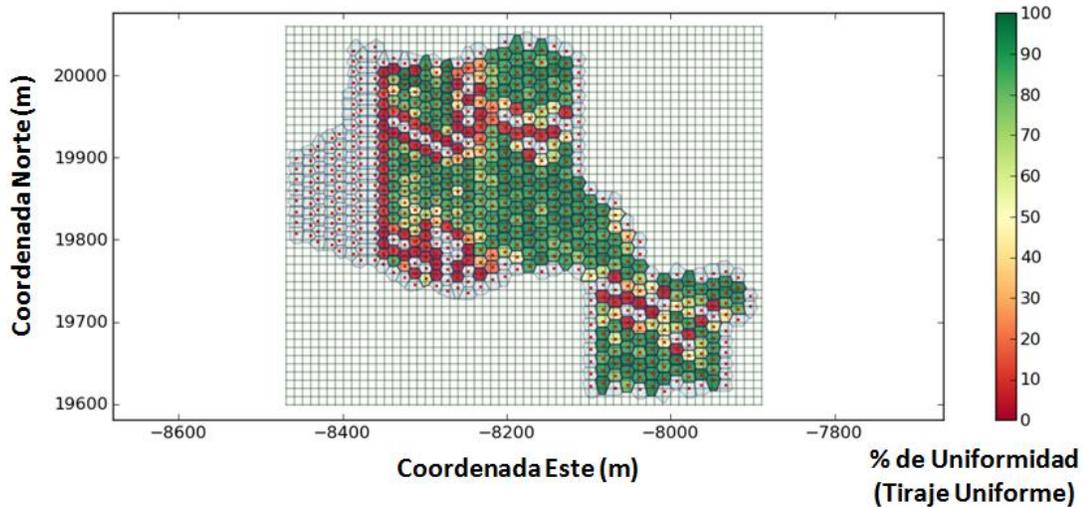


FIGURA 47: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) ICW

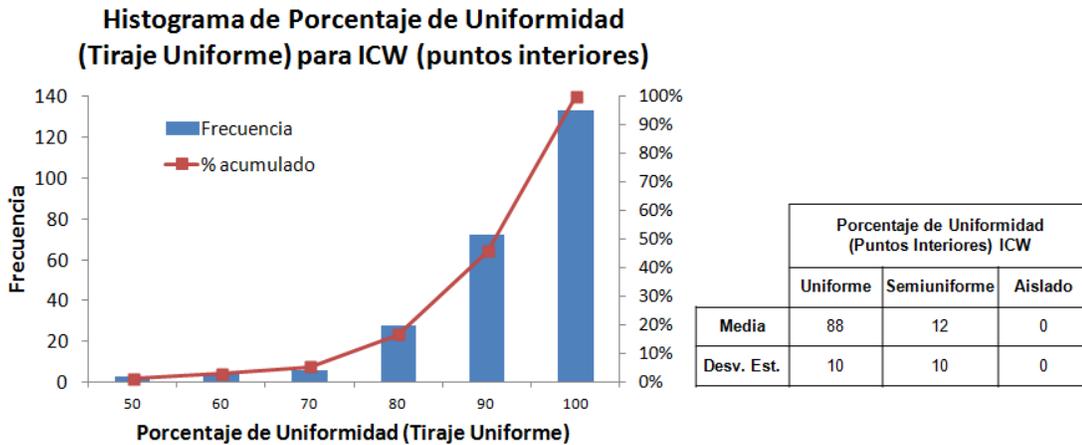


FIGURA 48: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA PUNTOS INTERIORES DE ICW

El punto de entrada de dilución declarado al 3% del contenido de dilución acumulada para el sector se muestra en una vista en planta en la Figura 49. En la figura, es posible apreciar que para la zona 1 en general los puntos poseen un PED(3%) entre 40% y 100%, luego en la columnas de mayor altura (zona 2), el PED(3%) se eleva sobre el 100% y existen varios puntos sin entrada de dilución declarada. Finalmente, para la zona 3, se observa entrada de dilución en una porción minoritaria de ésta y va desde el 80% hasta sobre el 100%. En el global, los puntos del ICW tienen un PED(3%) medio de 103% con una desviación estándar de 40%.

Acorde con el perfil del sector ICW, en lo que respecta a su ubicación directamente debajo de un sector previamente explotado y los altos PED(3%) registrados, es posible afirmar que el mecanismo de entrada de dilución principal en éste corresponde al desplazamiento vertical de la dilución desde el sector previamente explotado.

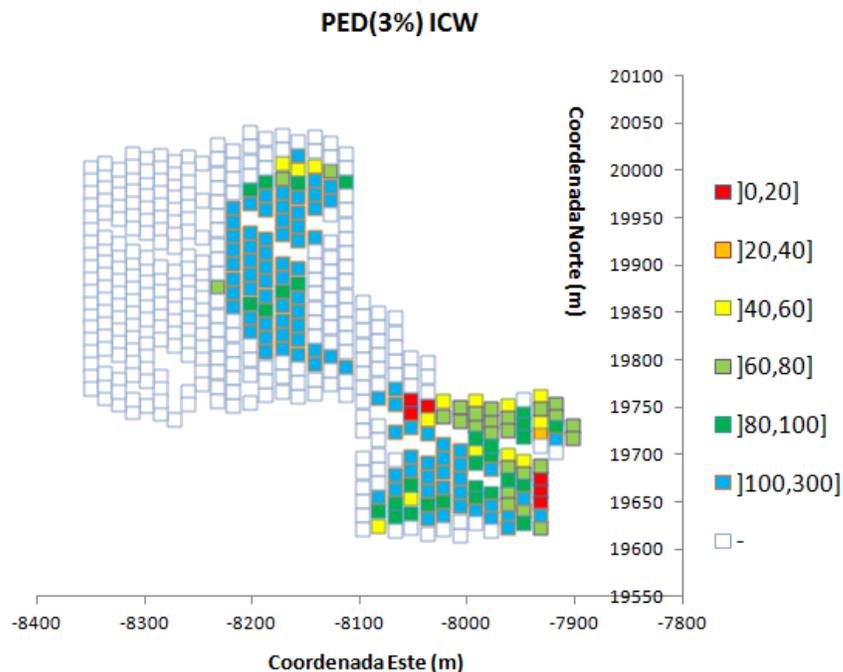


FIGURA 49: VISTA EN PLANTA PED(3%) PARA PUNTOS EXTRACCIÓN DE ICW

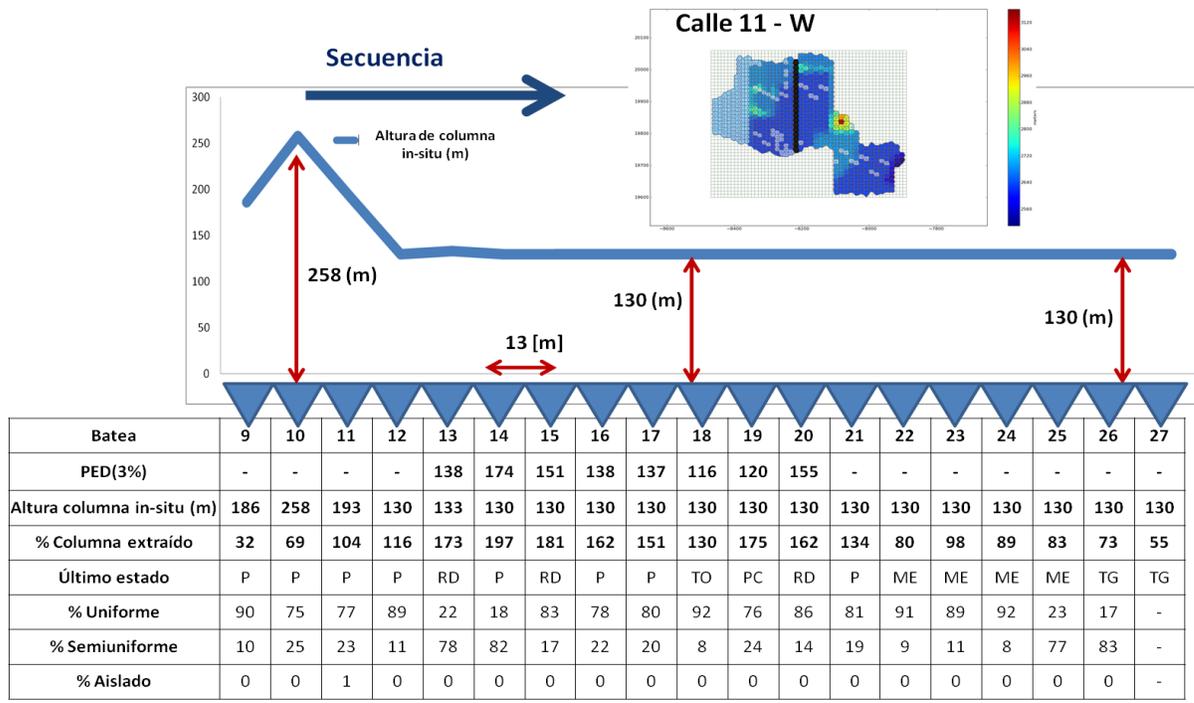


FIGURA 50: PERFIL DE LA CALLE 11-W DEL SECTOR ICW, EL ESTADO DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN ES: P: EN PRODUCCIÓN; RD: RESTRINGIDO POR DILUCIÓN; TO: TERMINADO POR RAZONES OPERACIONALES; PC: PROCESO DE CIERRE; ME: MAL ESTADO; TG: TERMINADO POR RAZONES GOMECÁNICAS

El perfil que correspondiente a la calle 11-W ilustrado en la Figura 50 muestra que no necesariamente los puntos extraídos con mayor uniformidad poseen un mayor PED(3%). La Figura 51 muestra que no existe una relación directa entre el PED(3%) y el porcentaje de uniformidad para todas las alturas en el sector ICW a nivel de puntos de extracción.

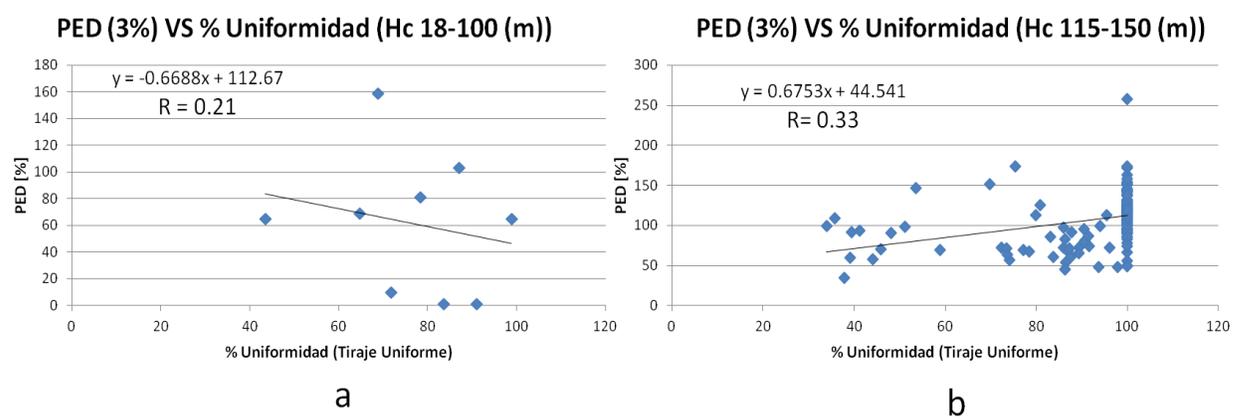


FIGURA 51: ICW: PED(3%) V/S PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU MENORES QUE 100 (M), Y B) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU ENTRE 115 (M) Y 150 (M)

De esta manera, para el sector ICW, el hecho de que la fuente de dilución se ubique justo por encima de los puntos de extracción hace que el movimiento preferencial de ésta sea vertical, lo que junto a un cuidado general de la extracción (porcentaje de

uniformidad en tiraje uniforme medio del 88%) genera un perfil de entrada tardía de la dilución a nivel global (PED(3%) medio de 103% con desviación estándar del 40%).

La Figura 52 muestra las toneladas y contenido de dilución extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PED (3%)). Es posible apreciar que el perfil de dilución extraída, tanto en toneladas como en contenido, no difiere del perfil con la suma de todos los puntos de extracción (Figura 46). Es decir, la entrada de dilución a nivel de plan de producción es la misma, así como el máximo contenido de dilución y las variaciones en el tiempo sólo difieren levemente al final de la vida del sector.

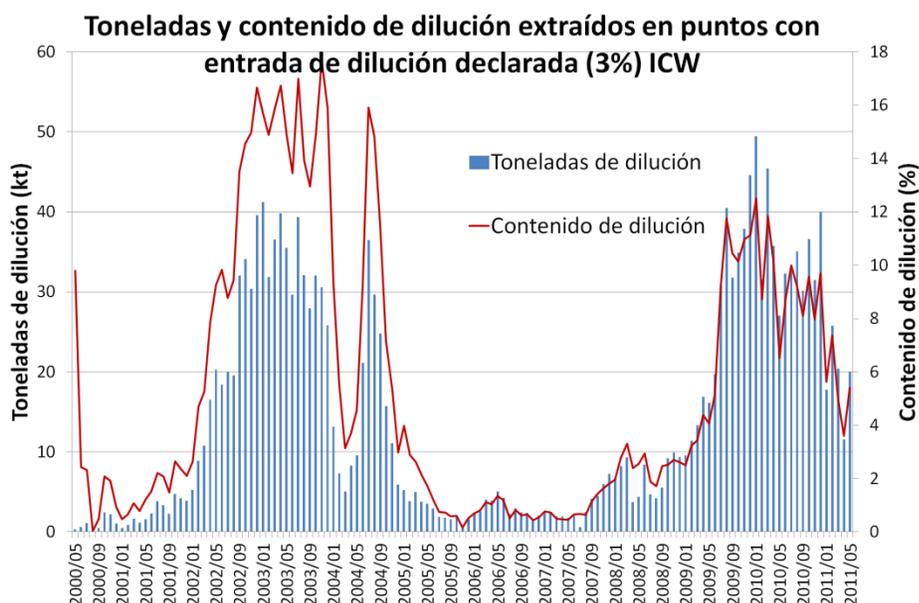


FIGURA 52: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO ICW

### 5.2.3 Inca Norte (IN)

La información correspondiente al sector Inca Norte cuenta con 578 puntos con extracción entre julio de 1994 y mayo de 2011. Las estadísticas e información del sector en términos de tonelajes y leyes extraídos se presentan en la Tabla 10 y en la Figura 53.

Las alturas de columna in-situ para los puntos de extracción del Inca Norte se muestran en una vista en planta en la Figura 54a. Es posible notar que las alturas de columna in-situ van desde 40 (m) hasta sobre los 500 (m) desde el sur al norte del sector. La mayoría de los puntos de extracción poseen alturas de columna in-situ entre 140 (m) y 150 (m). La secuencia de extracción del IN va desde sur a norte, es decir, desde las columnas más bajas a las más altas, como se aprecia en la Figura 54b.

La información y estadísticas de la dilución a escala de plan de producción se presentan en la Figura 55 y en la Tabla 17. Es posible notar que la entrada de la dilución a escala

de plan de producción ocurre en marzo de 1995, es decir, 10 meses después de haber comenzado la extracción y llega a superar el 20% del contenido extraído en el año 1997.

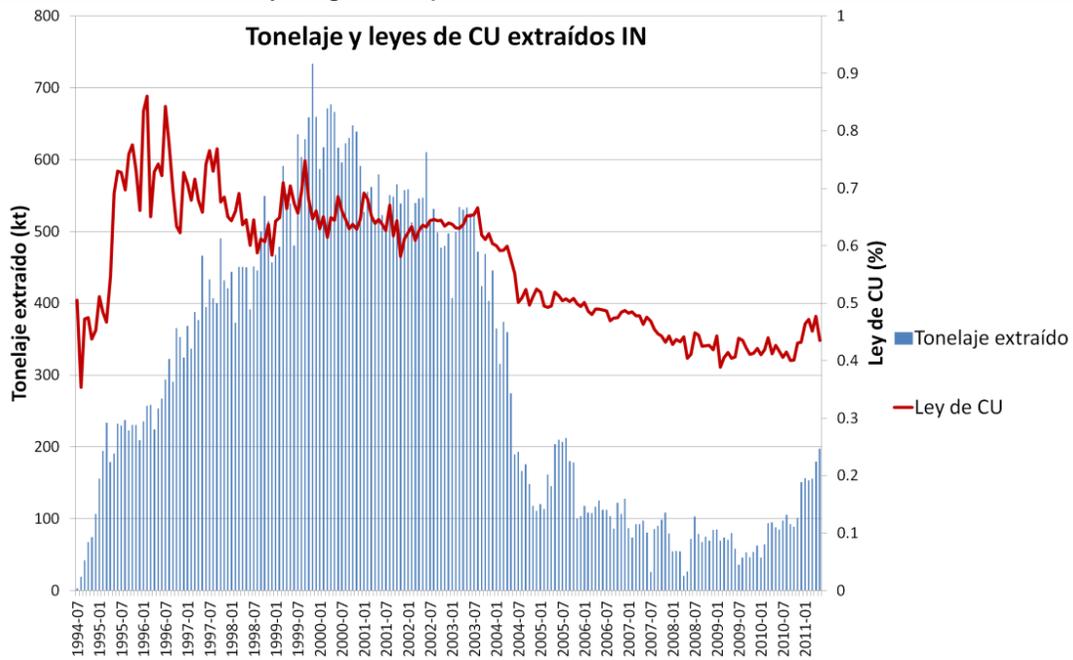


FIGURA 53: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS IN

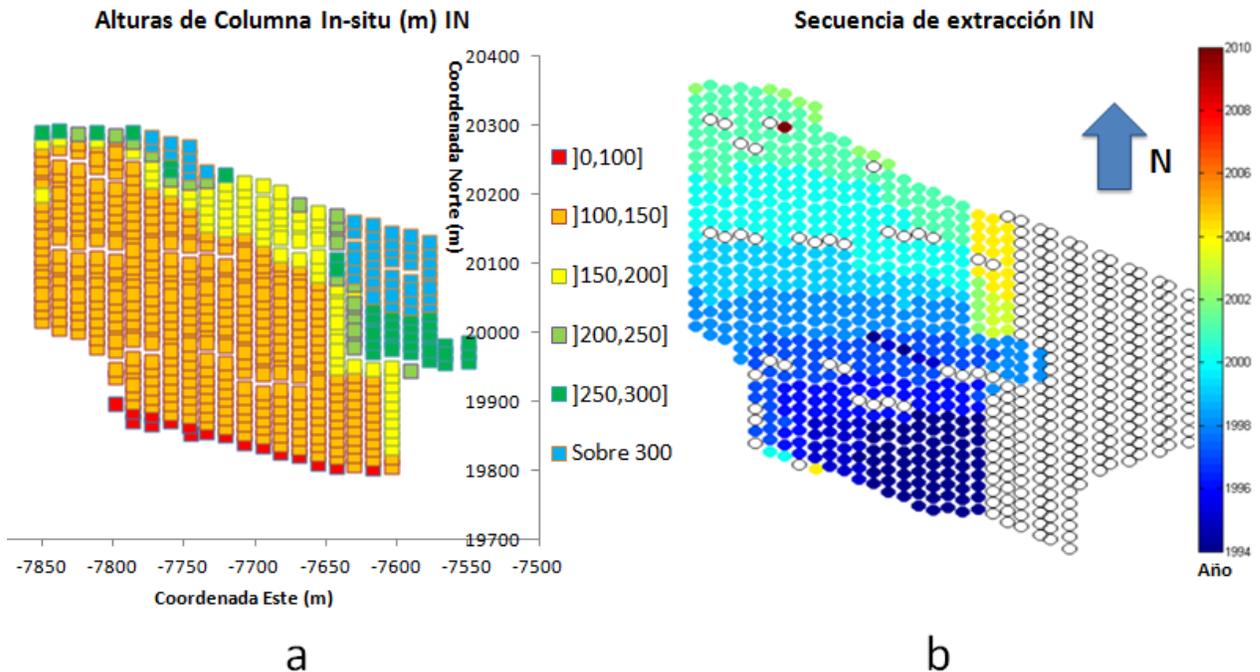


FIGURA 54: VISTAS EN PLANTA DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE IN, DONDE SE MUESTRAN: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

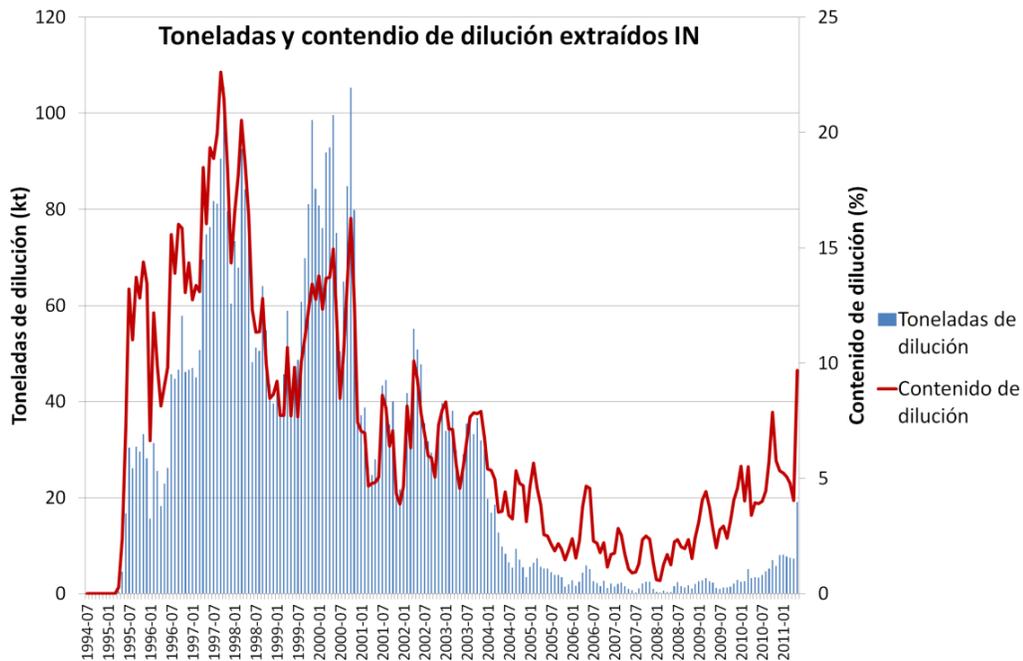


FIGURA 55: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS IN

TABLA 17: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA IN

| Estadísticas de dilución extraída ICW |              |                                 |            |                                    |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------------|------------|------------------------------------|
| Número de Puntos                      |              | Dilución extraída (kt, mensual) |            | Entrada de dilución sector (fecha) |
| Con Extracción                        | Con dilución | Media                           | Desv. Est. |                                    |
| 578                                   | 518          | 27.1                            | 28.3       | Mar-95                             |
| Área (m <sup>2</sup> )                | 97682        | 87542                           |            |                                    |

El porcentaje de uniformidad en tiraje uniforme para el sector Inca Norte se presenta en una vista en planta en la Figura 56. En términos generales, sólo una porción minoritaria de los puntos de extracción alcanza un porcentaje de uniformidad sobre el 90%. Además, varios puntos (un total de 25) que no resultan ser vecinos de puntos de vaciado poseen un porcentaje de uniformidad bajo el 50% en tiraje uniforme. La Figura 57 muestra el histograma y las estadísticas del porcentaje de uniformidad para los puntos interiores del sector IN. Es posible apreciar que el promedio del porcentaje de uniformidad en tiraje uniforme para los puntos interiores del sector es de 79%, lo que representa un menor control de la uniformidad de la extracción con respecto al resto de los sectores de El Salvador.

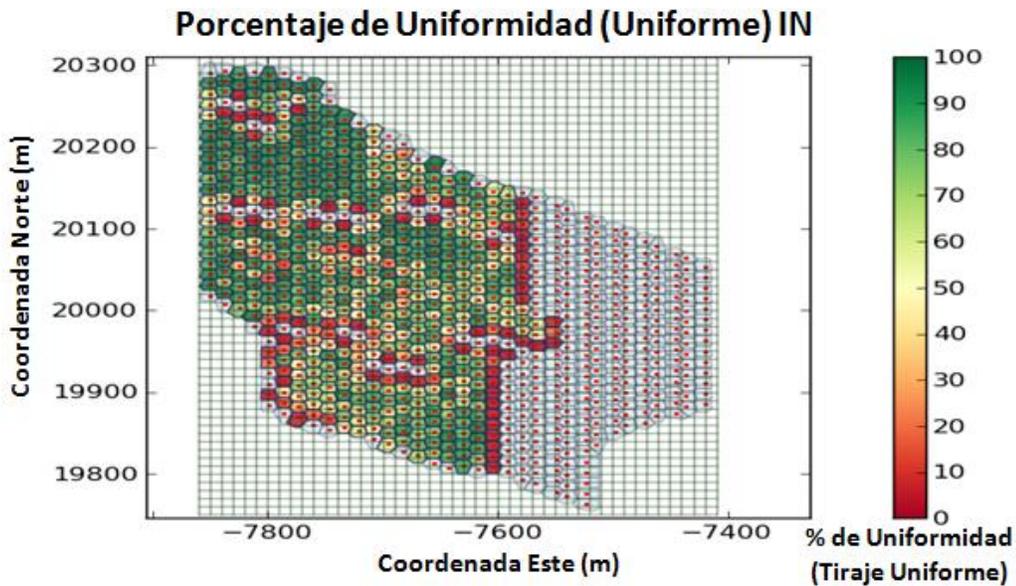


FIGURA 56: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) IN

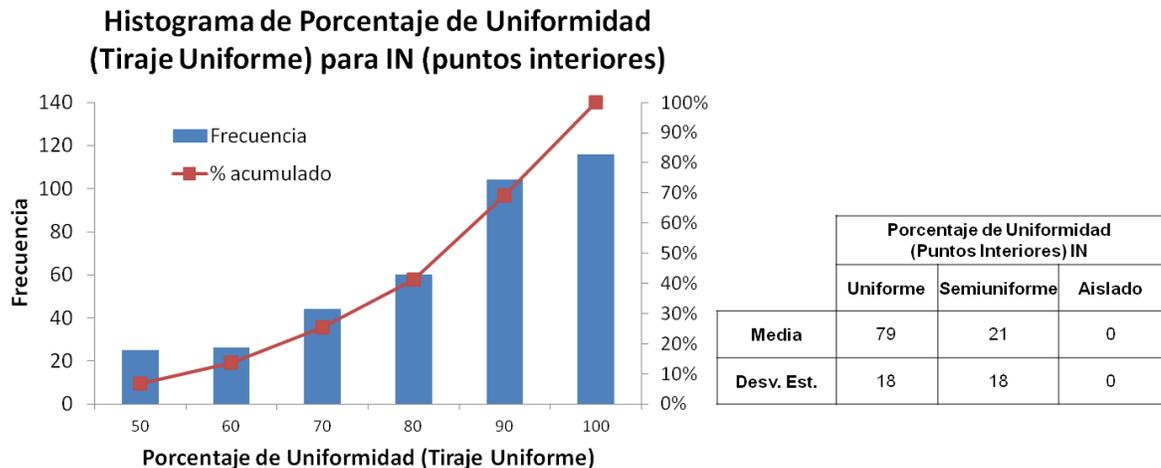


FIGURA 57: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA PUNTOS INTERIORES DE IN

El punto de entrada de dilución declarado al 3% del contenido de dilución acumulada (PED(3%)) para los puntos del sector Inca Norte se muestra en una vista en planta en la Figura 58. En la figura, es posible apreciar que, siguiendo la secuencia de extracción, los primeros puntos abiertos poseen un PED(3%) sobre el 80%, luego, en la zona central el PED(3%) disminuye, y en la zona norte del sector los puntos de extracción poseen un PED(3%) sobre el 100%. En términos cualitativos, se aprecia un comportamiento similar al observado en el sector ICE, donde la secuencia va desde las columnas in-situ más bajas hasta las altas, haciendo que los primeros puntos abiertos adviertan una entrada tardía de la dilución (sobre el 80% de columna extraída) haciéndose ésta más temprana a medida que la secuencia va encontrando alturas más altas en la zona media del sector y finalmente registrando PED(3%) sobre el 100% para los puntos del norte que resultan ser los más alejados de la fuente de dilución lateral ubicada en el sector sur. Lo cual evidencia un arrastre lateral del material diluyente desde el sur hacia el norte. El PED(3%) medio del sector es 78% con una desviación estándar de 70%.

### PED(3%) IN

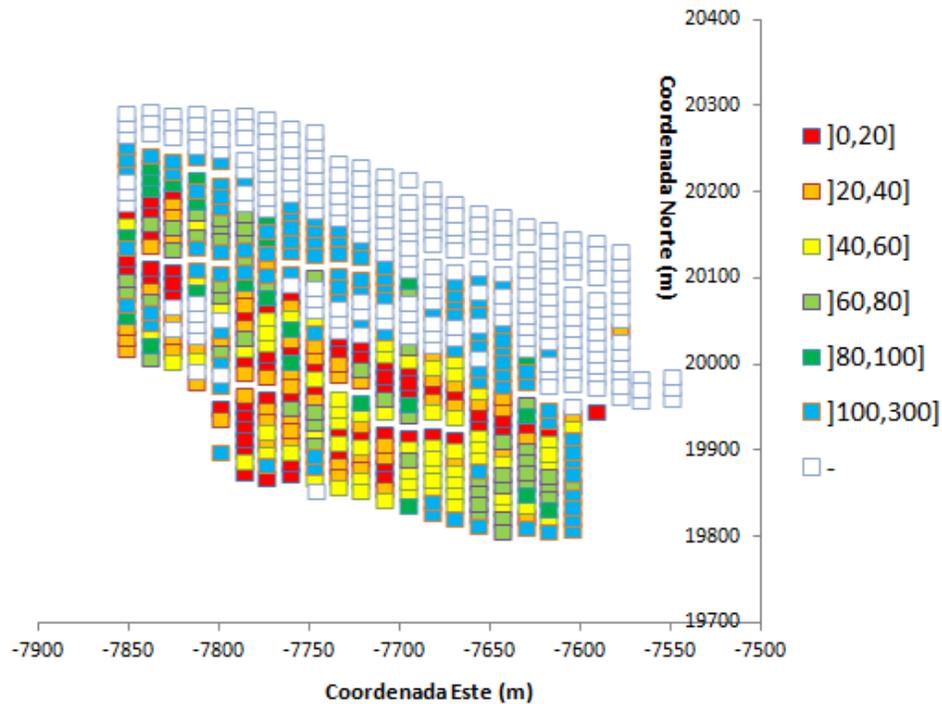


FIGURA 58: VISTA EN PLANTA PED(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN IN

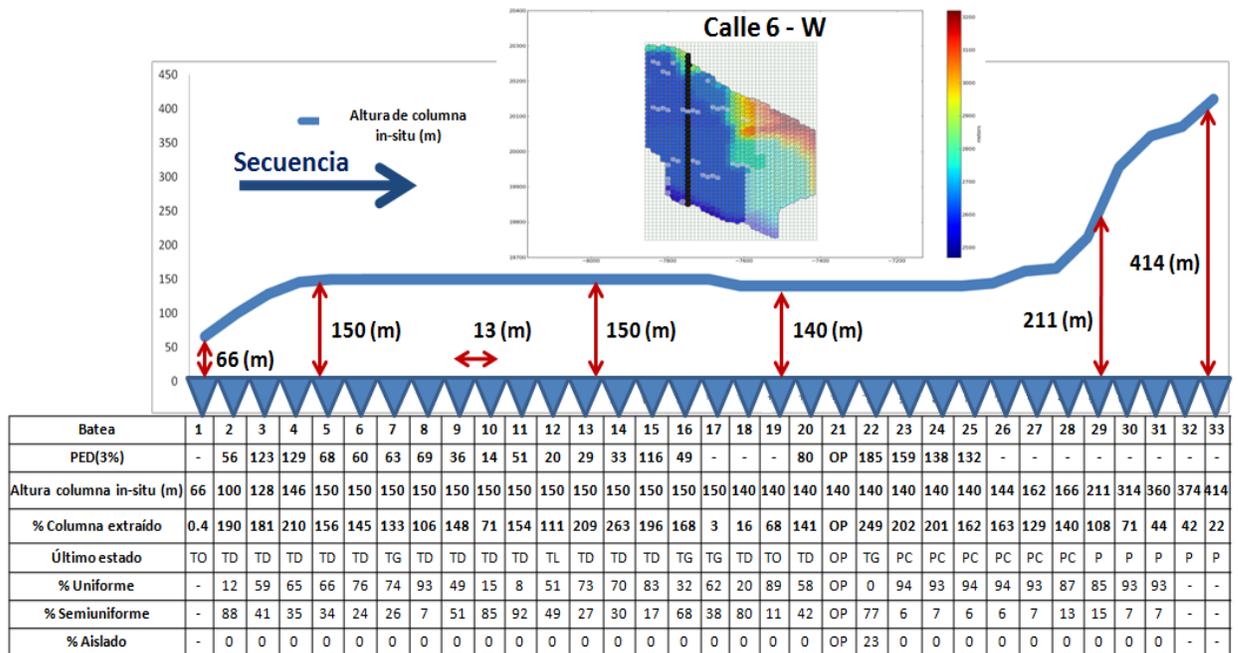


FIGURA 59: PERFIL DE LA CALLE 6-W DE SECTOR IN, EL ESTADO DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN ES: P: EN PRODUCCIÓN; PC: EN PROCESO DE CIERRE; OP: PUNTO DE VACIADO; TD: TERMINADO POR DILUCIÓN; TG: TERMINADO POR RAZONES GEOMECAICAS; TO: TERMINADO POR RAZONES OPERACIONALES

La Figura 59 muestra un perfil de la calle 6-W del sector Inca Norte. En el perfil es posible apreciar el comportamiento de la entrada de dilución. Las primeras 4 bateas

poseen un PED(3%) más alto que las siguientes, y la entrada de dilución se va haciendo más temprana a medida que se avanza en la secuencia hasta que en la batea 15 vuelve a subir el PED(3%). Además, es posible observar que a nivel de puntos de extracción no parece haber una relación directa entre la uniformidad con la cual se realiza la extracción y el PED(3%). La Figura 60 muestra que no existe una relación directa entre el porcentaje de uniformidad y el PED(3%) para todas las alturas de columna del sector IN.

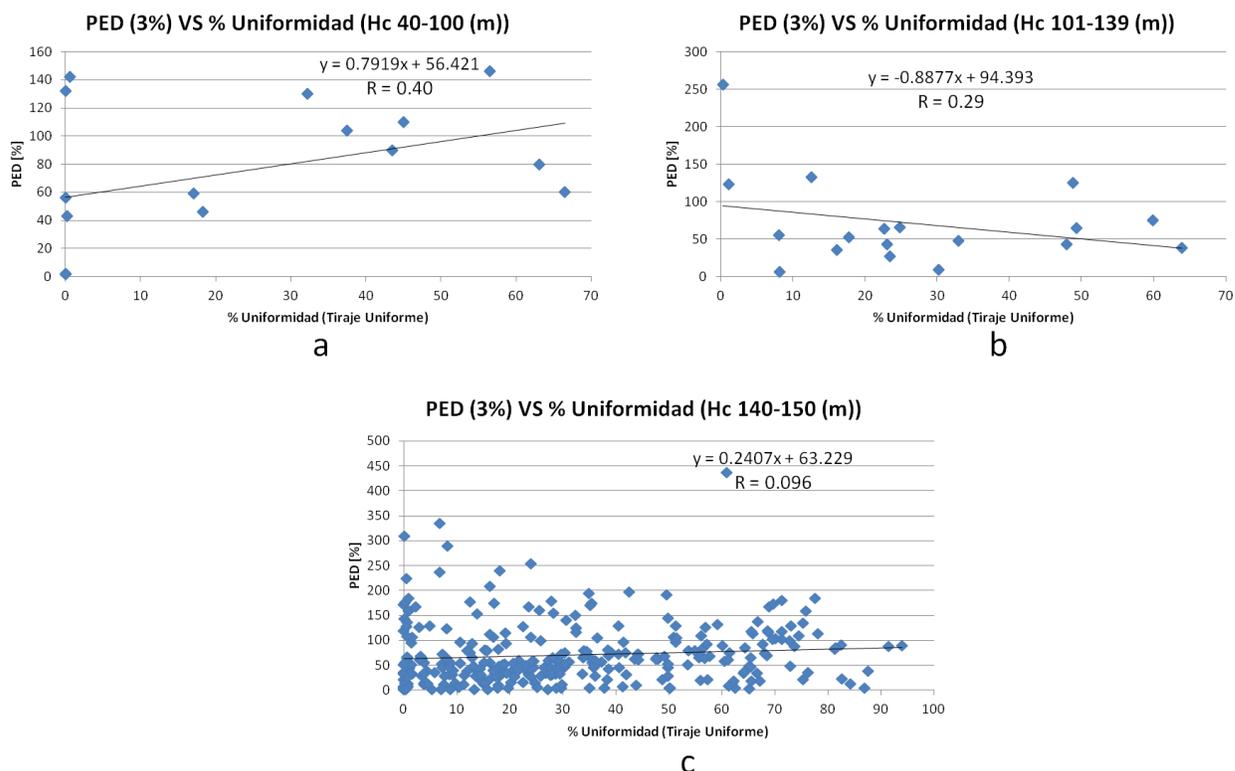


FIGURA 60: IN: PED(3%) V/S PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD, PARA: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU DE 40 A 100 (M), B) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU DE 101 A 139 (M), Y C) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU DE 140 A 150 (M)

La Figura 61Figura 42 muestra las toneladas y contenido de dilución extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PED (3%)). Es posible apreciar que el perfil de dilución extraída, tanto en toneladas como en contenido, no difiere del perfil con la suma de todos los puntos de extracción (Figura 55). De esta forma, al igual que para los sectores anteriores, tanto la entrada de dilución a nivel de plan de producción como el máximo contenido de dilución observado es el mismo si se consideran todos los puntos del sector o si se consideran sólo los puntos de extracción con entrada de dilución declarada. Las variaciones del contenido de dilución extraído en el tiempo sólo difieren levemente al final de la vida del sector, sin embargo, tampoco se observan cambios en la tendencia.

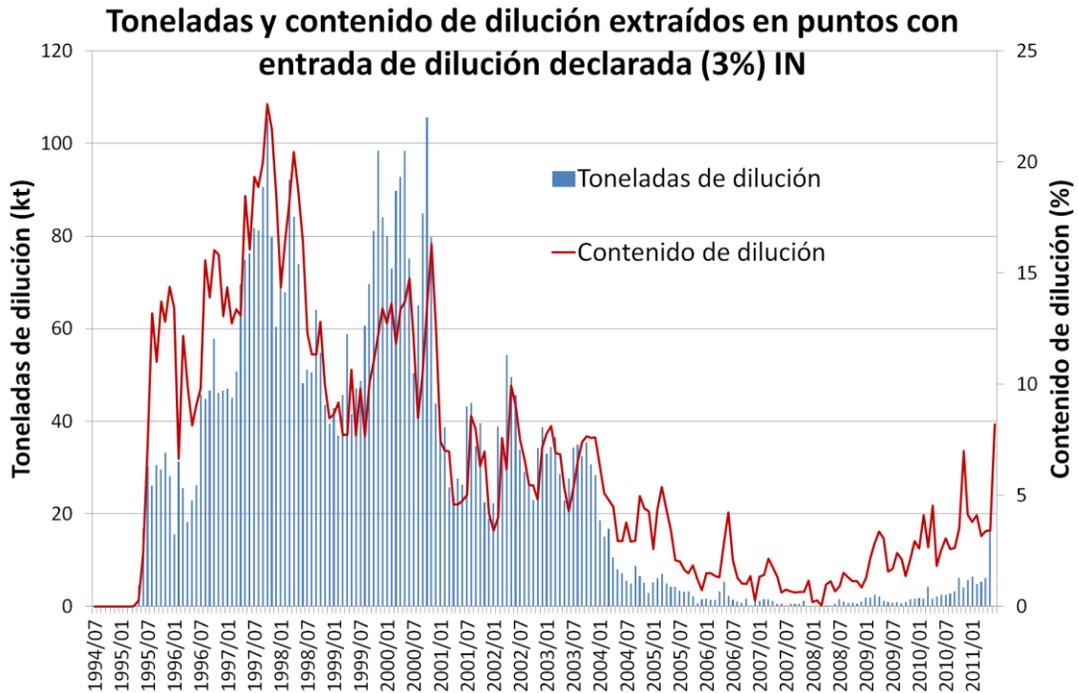


FIGURA 61: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO IN

#### 5.2.4 Inca Oeste (IW)

La información perteneciente al sector Inca Oeste corresponde a la extracción histórica de 363 puntos desde septiembre de 1995 a mayo de 2011. La información y estadísticas de la extracción del sector en términos de toneladas y leyes se presentan en la Tabla 10 y la Figura 62.

Las alturas de columna in-situ de los puntos de extracción del sector Inca Oeste se muestran en una vista en planta en la Figura 63a. En el caso de este sector, las alturas de columna in-situ van desde 112 (m) en la zona norte, luego alcanzan 220 (m) en la zona central donde se ubica la gran mayoría de los puntos, y finalmente, crecen sobre 400 (m) en la zona sur del sector. La secuencia de extracción, graficada en la Figura 63b, avanza de sur a norte en el sector, es decir, partiendo por las columnas in-situ más altas hasta las más bajas ubicadas al norte del sector.

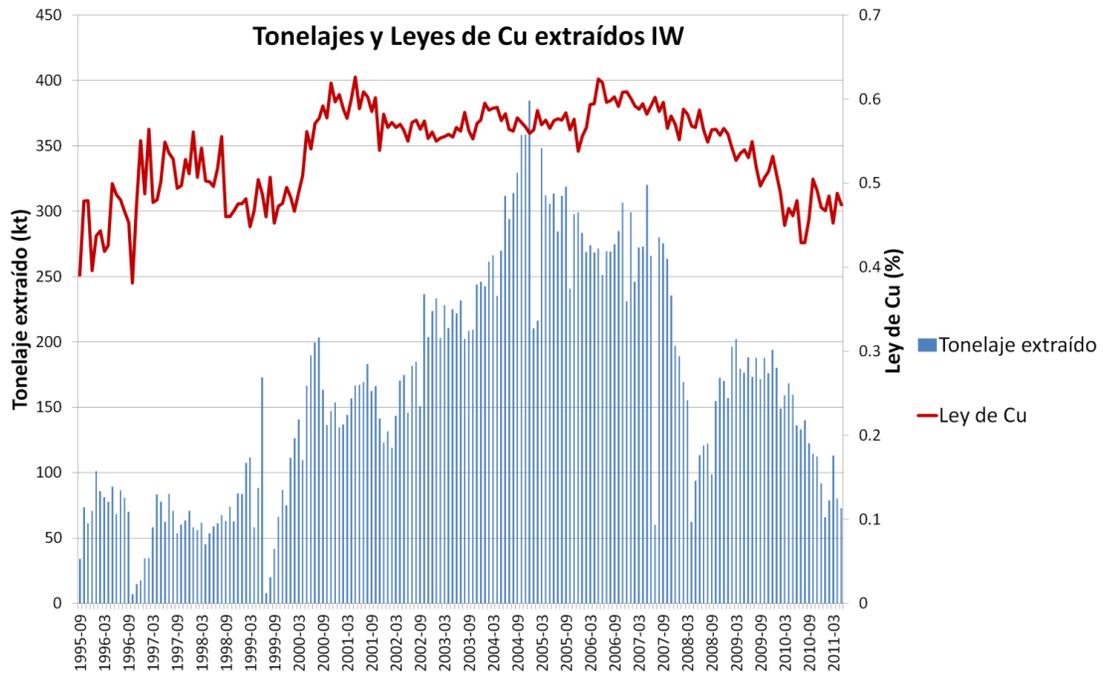


FIGURA 62: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS IW

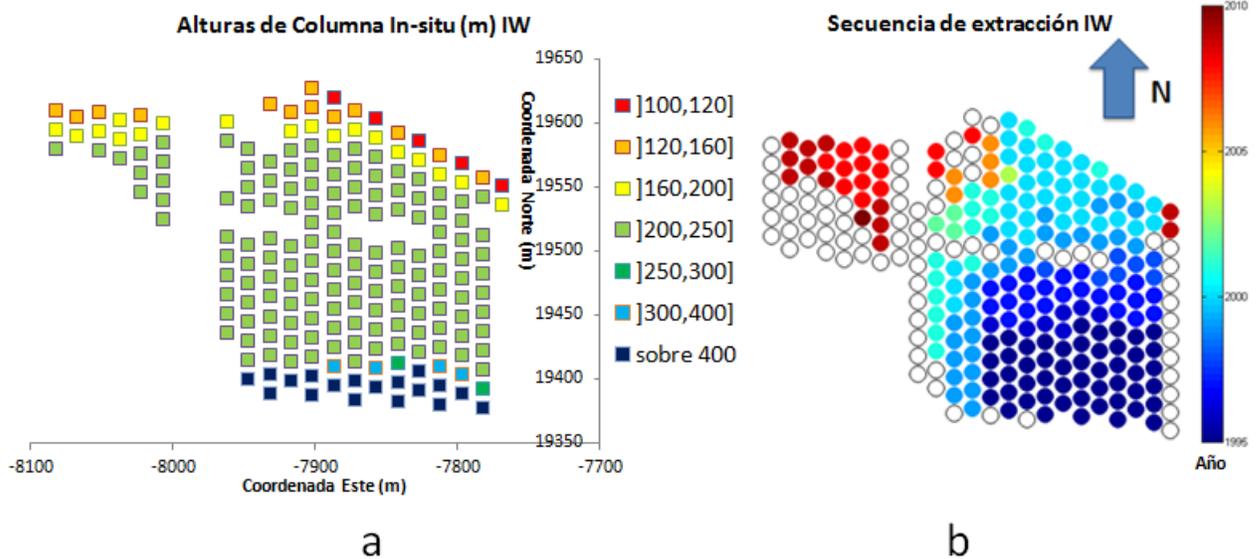


FIGURA 63: VISTAS EN PLANTA DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE IW, DONDE SE MUESTRAN: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

La muestra las toneladas y el contenido de dilución extraídas en el sector a escala de plan de producción se presentan en la Figura 64 y las estadísticas de dilución extraída se muestran en la Tabla 18. Es posible observar que la entrada de dilución a escala de plan de producción ocurre abruptamente en febrero de 2000, es decir, 4 años y 5 meses después de comenzada la extracción del sector. La explicación para este retraso en la entrada del material diluyente en el sector con respecto a lo ocurrido en los otros sectores de El Salvador, posee su origen en una colgadura del cave back al comienzo de la extracción que genera un gran bolsón de aire (air gap) y que desencadena un

estallido de aire (air blast) que ocurre en diciembre de 1999 (De Nicola y Fishwick, 2000), es decir, 2 meses antes de la entrada de dilución en el Inca Oeste.

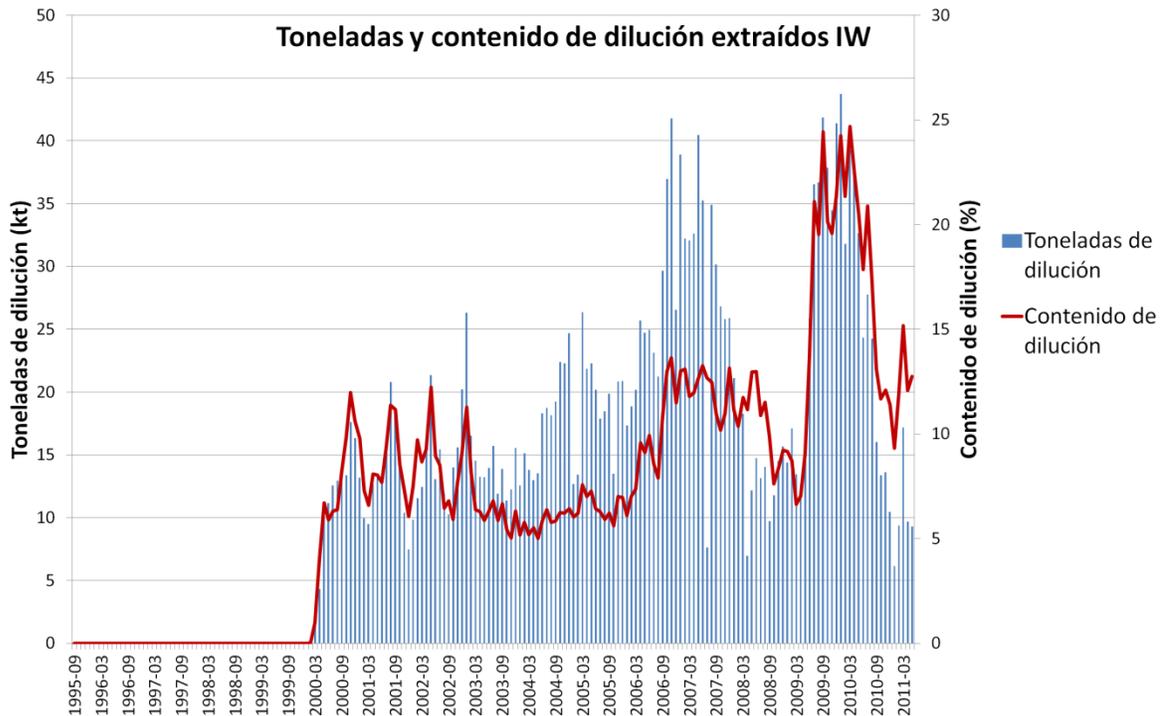


FIGURA 64: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS IW

TABLA 18: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA IW

| Estadísticas de dilución extraída IW |              |                                 |           |                                    |
|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|-----------|------------------------------------|
| Número de Puntos                     |              | Dilución extraída (kt, mensual) |           | Entrada de dilución sector (fecha) |
| Con Extracción                       | Con dilución | Media                           | Dev. Est. |                                    |
| 202                                  | 169          | 13.8                            | 11.7      | Feb-00                             |
| Área (m <sup>2</sup> )               | 45450        | 38025                           |           |                                    |

La Figura 65 ilustra el proceso de colgadura y el retraso de la entrada de dilución a nivel de sector producto de ésta según De Nicola y Fishwick (2000) en un perfil norte-sur secuenciado. Se observa que una vez que la propagación del cave back alcanza el material quebrado que contiene limonita encima del sector, el arco de roca in-situ colapsa liberando el aire y permitiendo el flujo de la dilución hacia los puntos de extracción.

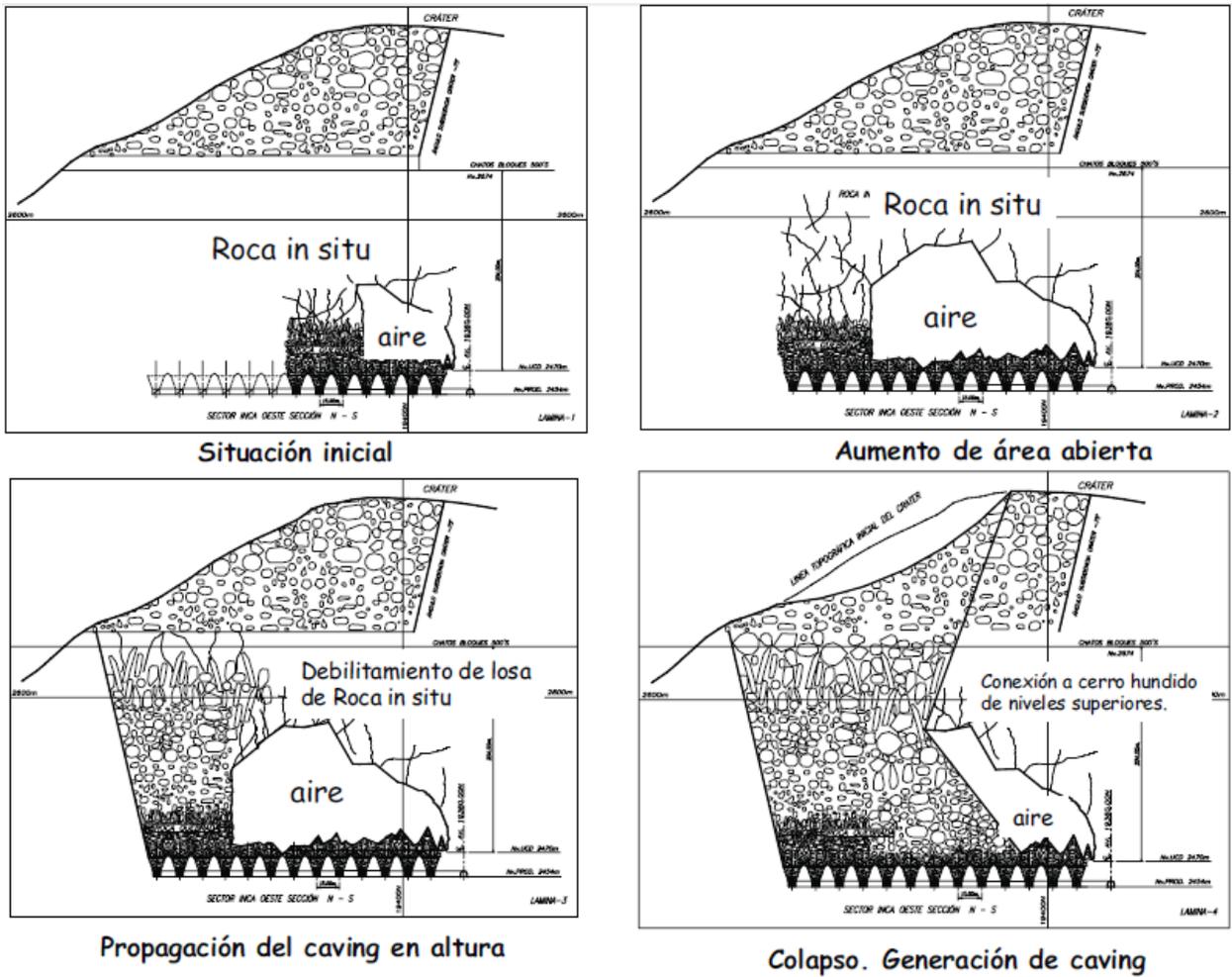


FIGURA 65: SECUENCIA DE EVENTOS DE COLAPSO Y ESTALLIDO DE AIRE EN EL COMIENZO DE LA SECUENCIA DE IW (DE NICOLA Y FISHWICK, 2000)

El porcentaje de uniformidad para los puntos de extracción del sector se muestra en una vista en planta en la Figura 66. En términos generales, los puntos de extracción del sector muestran altos porcentajes de uniformidad. La Figura 67 muestra el histograma y las estadísticas del porcentaje de uniformidad para los puntos interiores del Inca Oeste. El porcentaje de uniformidad promedio para estos puntos es 84%, lo que indica una extracción uniforme en términos de tonelaje para el sector.

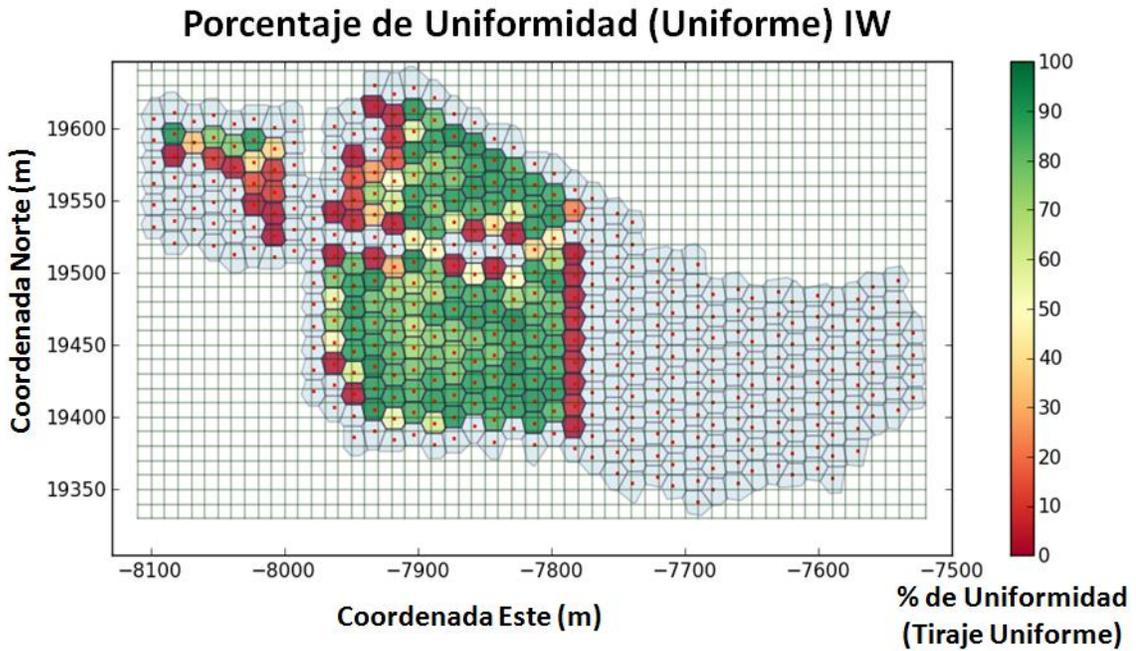


FIGURA 66: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) IW

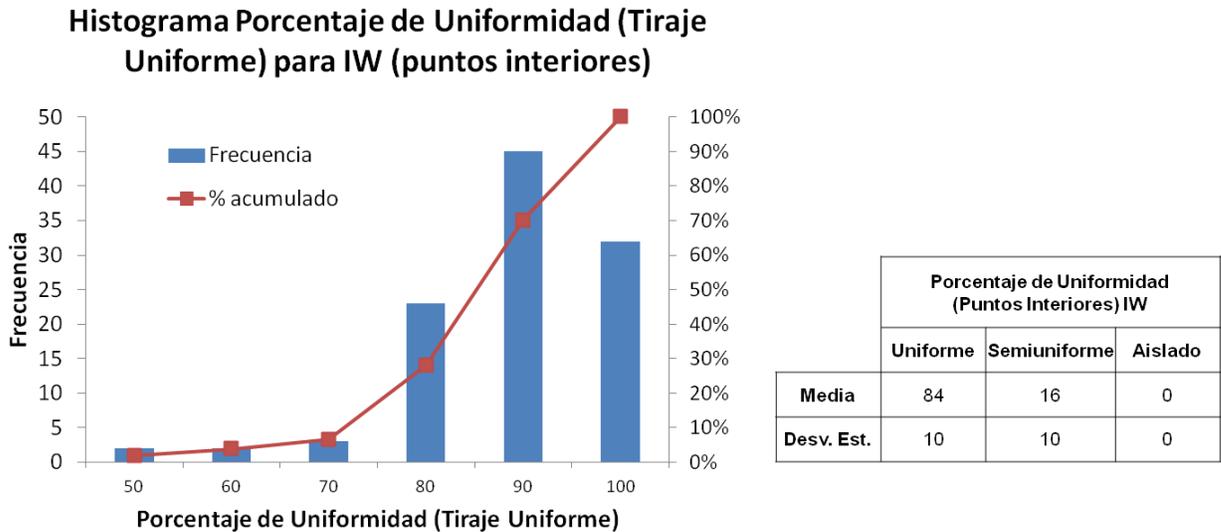


FIGURA 67: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA PUNTOS INTERIORES DE IW

El punto de entrada de dilución declarado al 3% del contenido acumulado (PED(3%)) para los puntos de extracción del Inca Oeste se presenta en una vista en planta en la Figura 68. En la figura, se puede apreciar que los puntos de extracción ubicados en la zona sur del sector poseen una entrada de la dilución temprana (PED(3%)), mientras que los que se ubican en la zona norte del sector evidencian una entrada de la dilución más tardía (PED(3%) mayor). Resulta evidente pensar que los puntos de extracción de la zona sur denotan una entrada más temprana de la dilución debido a la colgadura del cave back ocurrida en esa área del sector. El PED(3%) promedio del sector es 67% con una desviación estándar de 48%.

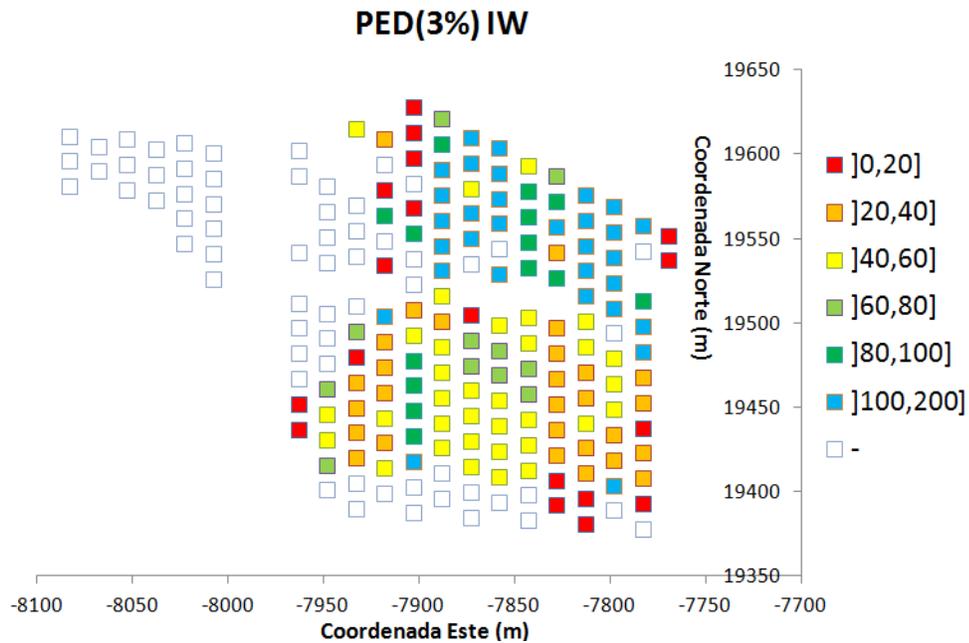


FIGURA 68: VISTA EN PLANTA PED(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN IW

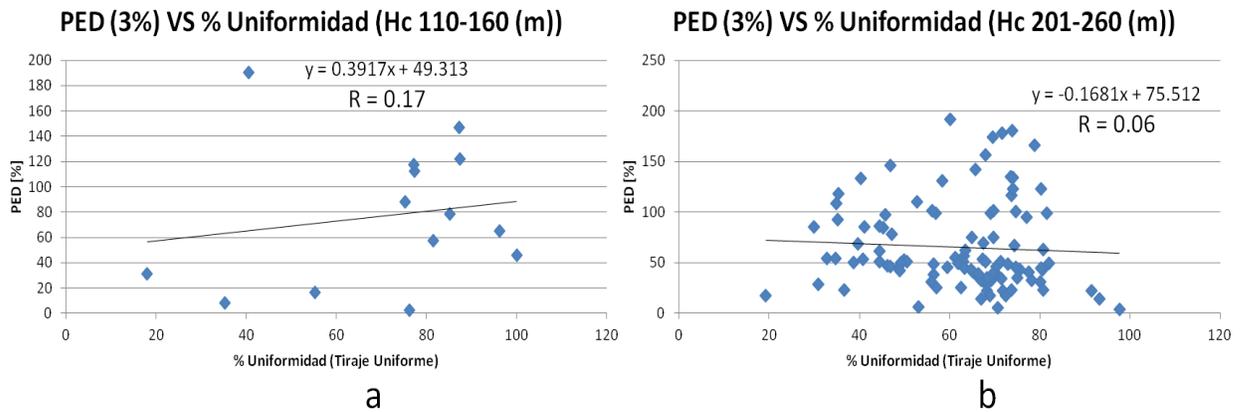


FIGURA 69: IW: PED(3%) V/S PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD, PARA: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU ENTRE 110 Y 160 (M), Y B) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU ENTRE 201 Y 260 (M)

La Figura 69 muestra que no existe una relación directa entre el PED(3%) y el porcentaje de uniformidad en tiraje uniforme para todas las alturas del IW.

De esta forma, en el sector Inca Oeste, el mecanismo de entrada de dilución queda gobernado por el efecto de la colgadura del cave back y posterior air blast, que introduce dilución de manera temprana a los puntos de extracción del sur del sector que fueron afectados por esta colgadura.

La Figura 70 (Figura 42) muestra las toneladas y contenido de dilución extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PED (3%)). Es posible apreciar que el perfil de dilución extraída, tanto en toneladas como en contenido, no difiere del perfil con la suma de todos los puntos de extracción (Figura 64). Así, tanto la entrada de dilución a nivel de plan de producción, el máximo contenido de dilución observado y la tendencia del contenido extraído en el tiempo son iguales si se consideran todos los puntos del sector o si se consideran sólo los puntos de extracción con entrada de dilución declarada.

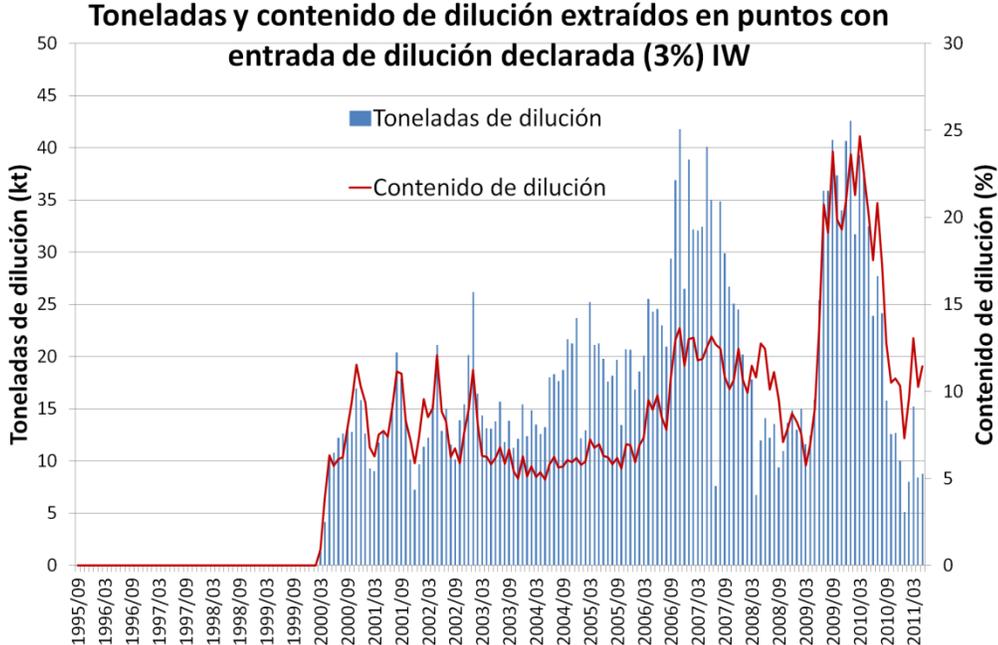


FIGURA 70: TONELADAS Y CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDOS POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO IW

## 5.2.5 Resumen hipótesis de entrada de dilución en El Salvador

La Tabla 19 resume las hipótesis de entrada de dilución formuladas para los sectores productivos de El Salvador analizados. La Tabla 20 resume los principales índices del análisis.

TABLA 19: RESUMEN DE HIPÓTESIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN EL SALVADOR

|   | Sector   |   |   |   |
|---|--|---|---|---|
|   | ICE  | ICW   | IN  | IW  |
| Hipótesis de entrada de dilución (limonita) | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción de este sector parte desde las columnas in-situ más bajas (bajo 50 (m)) hacia las más altas (sobre 400 (m)).</li> <li>➤ En el sentido de la secuencia se observa que la entrada de dilución se hace cada vez más temprana hasta la barrera generada por los puntos de vaciado.</li> <li>➤ El mecanismo de entrada de dilución es <b>lateral</b> proveniente del norte del sector.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción de este sector parte de alturas de columna in-situ de 130 (m) (zona 1), pasando por alturas de columna sobre los 200 (m) (zona 2) y vuelve a tomar por alturas de columna de 130 (m) (zona 3).</li> <li>➤ El PED(3%) va desde 40 a 100% para la zona 1, luego se incrementa sobre el 100% para la zona 2, y va desde 80% a sobre 100% en la zona 3.</li> <li>➤ El Mecanismo de entrada de dilución es <b>vertical</b> proveniente del sector previamente explotado ubicado sobre el ICW.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción del sector parte desde alturas de columna in-situ bajo los 100 (m) hacia columnas de 150 (m) (mayor parte de los puntos) y encuentra columnas sobre los 200 (m) al final.</li> <li>➤ En el sentido de la secuencia la entrada de la dilución se va haciendo más temprana hasta la zona central del sector (PED(3%) bajo el 40%) y luego aumenta el PED(3%) en la zona norte.</li> <li>➤ El mecanismo de entrada de dilución en la zona central es <b>lateral</b> proveniente del sur del sector.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La ocurrencia de un air blast debido a una colgadura del cave back al inicio de la secuencia sugiere que la entrada de la dilución queda controlada por la propagación repentina de éste y la aparición de material diluyente luego del evento.</li> </ul> |

TABLA 20: RESUMEN DE ÍNDICES ANÁLISIS DE DILUCIÓN EL SALVADOR

| Sector de El Salvador |     | Alturas de columna in-situ | Porcentaje de Uniformidad (Tiraje Uniforme) de puntos interiores | PED(3%)    |
|-----------------------|-----|----------------------------|--|------------|
|                       |     | (m)                        | (%)  | (%)        |
| Inca Central Este     | ICE | 226 ± [173]                | 88 ± [10]  | 57 ± [54]  |
| Inca Central Oeste    | ICW | 159 ± [53]                 | 88 ± [10]  | 103 ± [40] |
| Inca Norte            | IN  | 181 ± [85]                 | 79 ± [18]  | 78 ± [70]  |
| Inca Oeste            | IW  | 247 ± [122]                | 84 ± [10]  | 67 ± [48]  |

### 5.3 ANÁLISIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN ANDINA

La base de datos completa de División Andina se corresponde a la extracción histórica del Panel III desde diciembre de 1995 a enero de 2012 (Tabla 9). Sin embargo, información proveniente de geología referente al muestreo de dilución (tanto de riolita como de material quebrado) en los puntos de extracción se encuentra disponible desde enero de 2006 hasta enero de 2012 (Tabla 7). De manera de poder analizar las curvas de dilución para la vida completa de los puntos de extracción (hasta enero de 2012), se realiza el análisis sobre aquellas áreas productivas abiertas desde enero de 2006. Así se definen 2 clusteres de dilución, el primero correspondiente a los puntos del sector Parrillas que fueron abiertos desde enero de 2006 (Cluster Parrillas) y el segundo correspondiente a los puntos de extracción del sector LHD que fueron abiertos desde enero de 2006 (Cluster LHD) (Figura 21). Tal diferenciación entre el sector LHD y el sector Parrillas se debe a que el nivel de producción y hundimiento del Panel III de Andina se encuentran compuestos de dos tipos de roca en contacto, el primario (sector LHD) y el secundario (Parrillas). Así, ambos sectores poseen diferentes tipos de malla de extracción y sistemas de manejo de minerales, además de diferentes condiciones de borde con respecto a la dilución. La Figura 71 ilustra el contacto entre el primario y el secundario, además de la disposición espacial de los clusteres de dilución y sus niveles de hundimiento (UCL). La Figura 72 muestra los distintos tipos de malla de extracción en el Panel III.

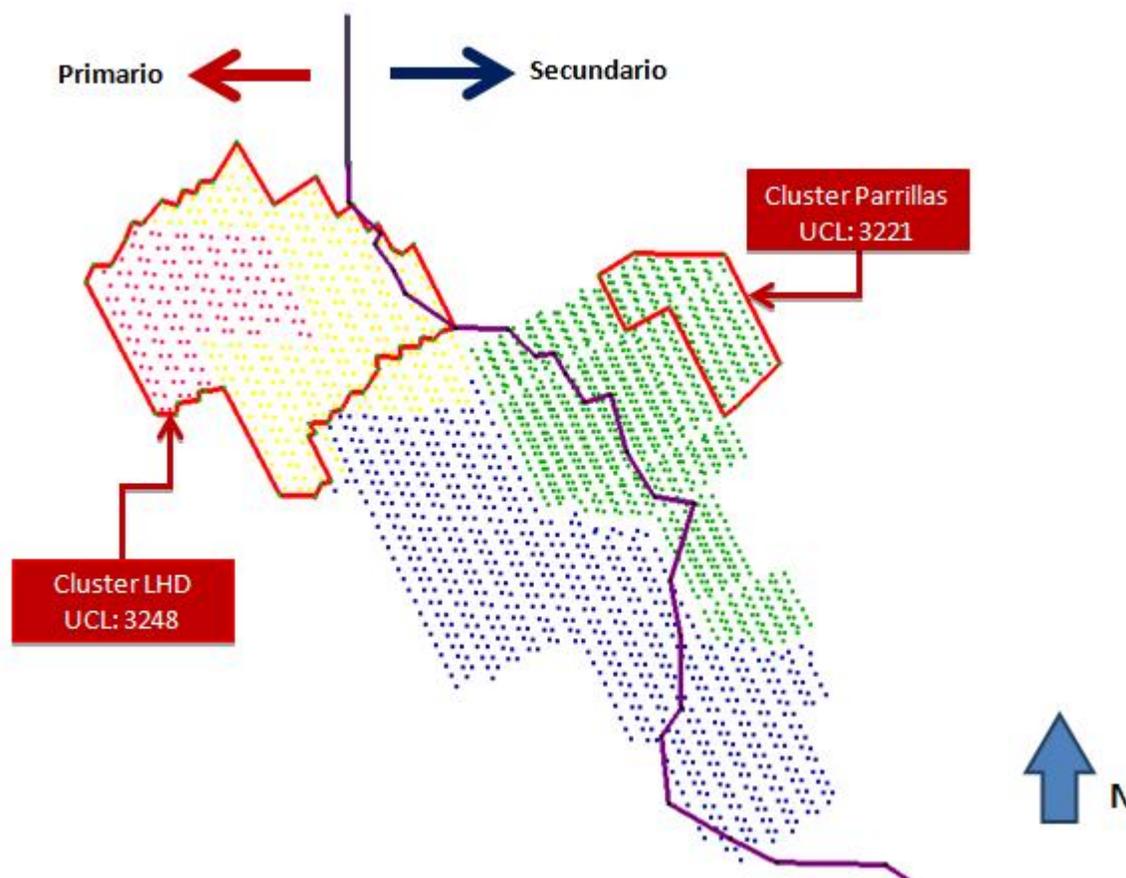


FIGURA 71: VISTA EN PLANTA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE PANEL III, DONDE SE MUESTRA: CONTACTO PRIMARIO - SECUNDARIO Y UBICACIÓN ESPACIAL DE CLUSTERES DE DILUCIÓN

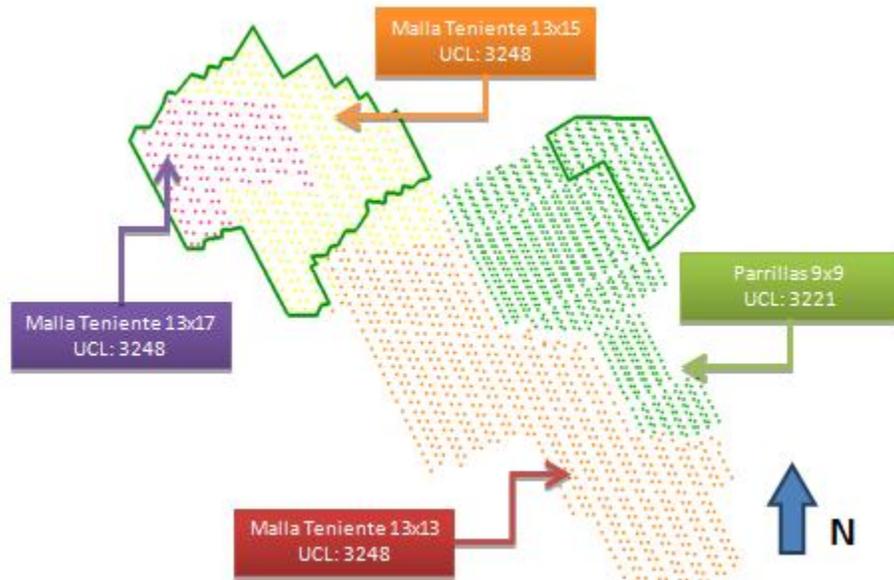


FIGURA 72: VISTA EN PLANTA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE PANEL III, DONDE SE MUESTRAN DISTINTOS TIPOS DE MALLA DE EXTRACCIÓN Y NIVELES DE HUNDIMIENTO

La secuencia de extracción del Panel III de Andina comienza en el sector de parrillas y va incorporando área avanzando hacia el suroeste. Luego, a partir del año 2000, comienza a avanzar hacia el sureste y el noreste en 2004. Finalmente, se abren los paneles correspondientes a los clusters de dilución. Esta secuencia se ilustra en una vista en planta en la Figura 73.

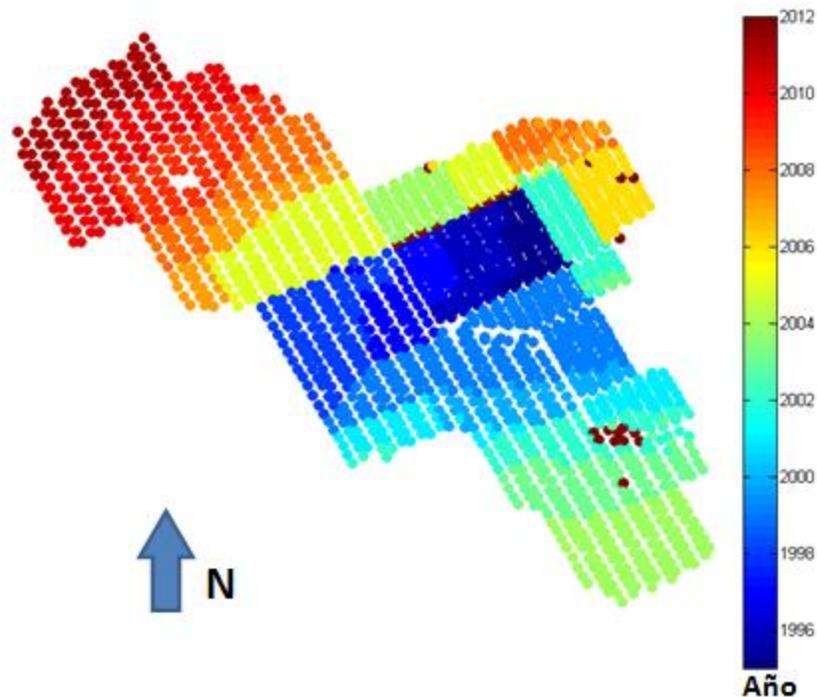


FIGURA 73: VISTA EN PLANTA SECUENCIA DE EXTRACCIÓN PANEL III ANDINA

Para los clusteres de dilución del Panel III de Andina, las condiciones de borde con respecto a la dilución son distintas. Además, como se menciona anteriormente, existen 2 fuentes de dilución para el Panel III, el material quebrado ubicado justo encima del centro correspondiente a la extracción agotada del Panel II, y una chimenea riolítica (que contiene riolita) ubicada al noreste del Panel III. Las superficies de contacto entre la roca mineral in-situ y las fuentes de dilución se ilustran en una vista isométrica en la Figura 74. De esta forma, el análisis de la entrada de dilución debe realizarse de manera diferenciada para ambos clusteres.

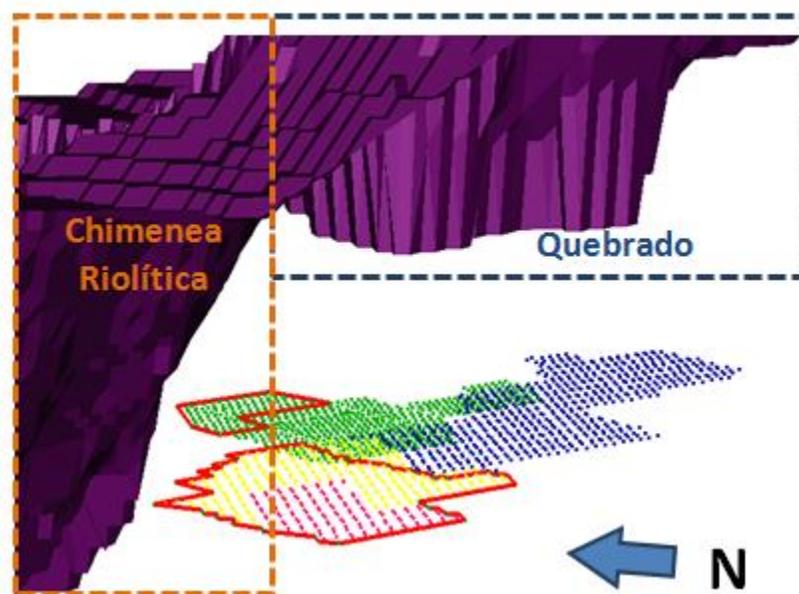


FIGURA 74: VISTA ISOMÉTRICA DE SUPERFICIES DE CONTACTO ENTRE LA ROCA IN-SITU, EL MATERIAL QUEBRADO Y LA CHIMENEA RIOLÍTICA; CLUSTERES DE DILUCIÓN (EN ROJO)

### 5.3.1 Cluster Parrillas

La información de extracción del Cluster Parrillas (CP) se compone de 148 puntos con extracción desde junio de 2006 a julio de 2010. Las estadísticas e información de la extracción con respecto a las leyes de Cu y tonelajes extraídos del sector se presentan en la Tabla 21 y en la Figura 75.

Las alturas de columna in-situ para el cluster se calculan como la distancia vertical desde el UCL hasta las superficies conjuntas de quebrado y chimenea riolítica y se muestra en la Figura 76a. Las menores alturas de columna (bajo 400(m)) corresponden a puntos de extracción ubicados debajo de la proyección de la chimenea riolítica. La Figura 76b ilustra la secuencia de extracción de los puntos del Cluster Parrillas. Es posible apreciar que la primera zona abierta en 2006 posee una diferencia temporal importante con el panel contiguo abierto entre 2001 y 2003. De igual forma, la zona norte abierta en 2008 difiere posee una diferencia temporal notable con el panel contiguo abierto entre 2004 y 2005.

TABLA 21: ESTADÍSTICAS TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDAS CLUSTER PARRILLAS

| Estadísticas de extracción de toneladas y leyes Cluster Parrillas |       |                                 |            |                                  |            |                         |                              |
|---|-------|---------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-------------------------|------------------------------|
| Número de puntos  |       | Tonelaje extraído (kt, mensual) |            | Ley de Cu extraída (% , mensual) |            | Número períodos (meses) | Tonelaje total extraído (Mt) |
| Con extracción  | Total | Media                           | Desv. Est. | Media                            | Desv. Est. |                         |                              |
| 148   | 148   | 149                             | 90         | 1.0                              | 0.13       | 50                      | 7.5                          |

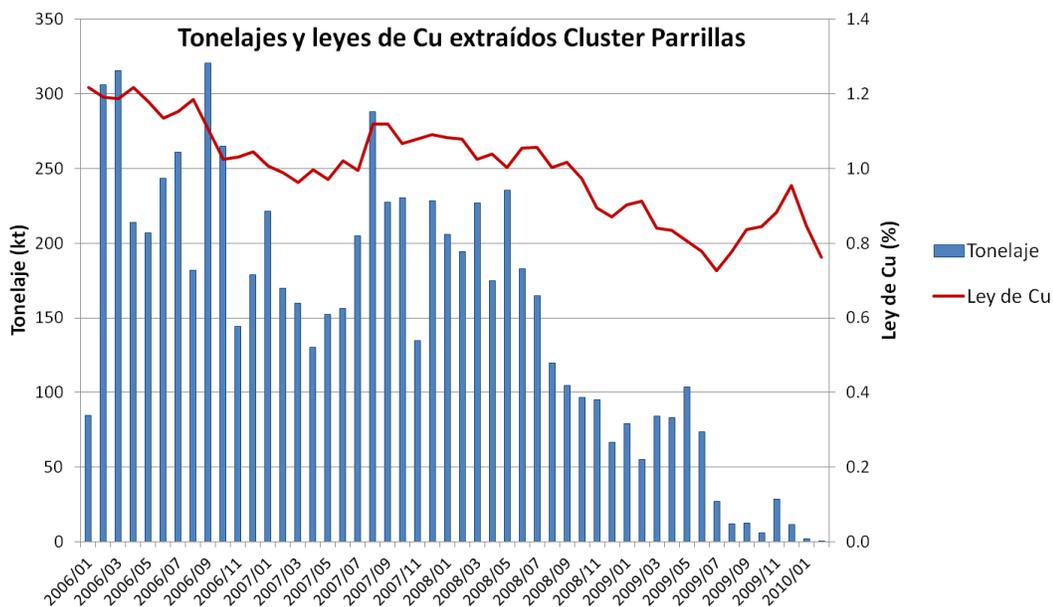


FIGURA 75: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS CLUSTER PARRILLAS

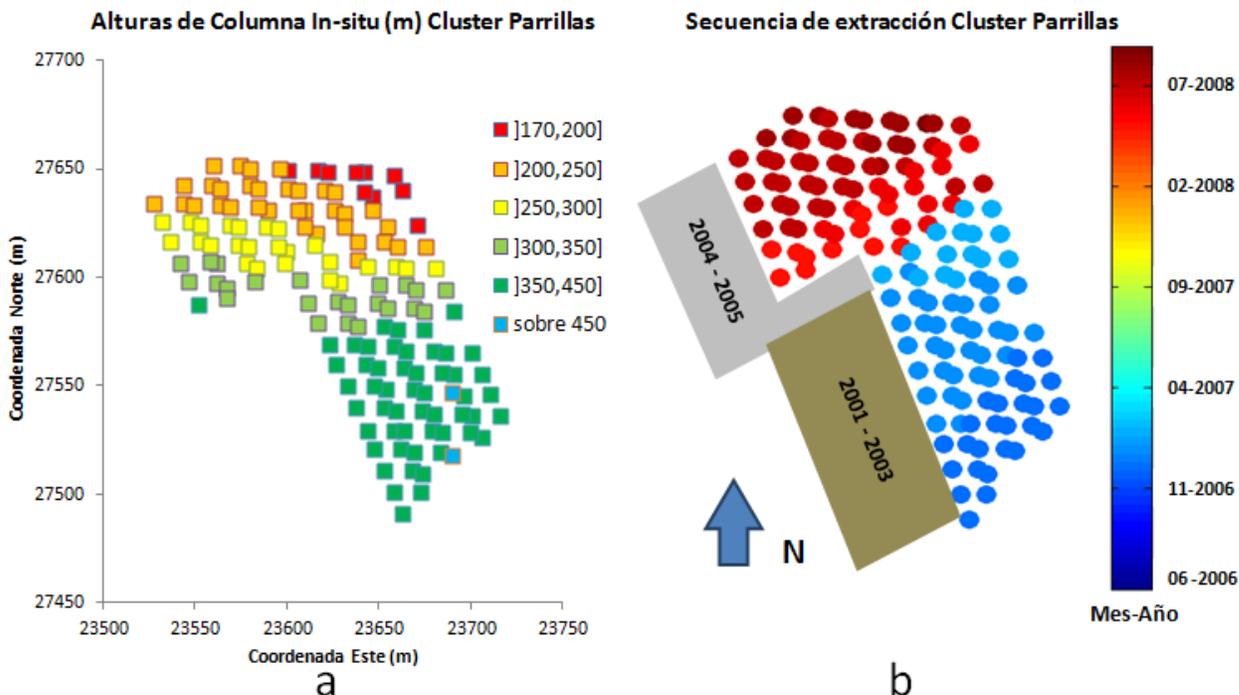


FIGURA 76: VISTAS EN PLANTA PUNTOS DE EXTRACCIÓN CLUSTER PARRILLAS, DONDE SE MUESTRAN: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

La información y estadísticas de la dilución extraída en términos de material quebrado y riolita a escala de cluster se presentan en la Figura 77 y en la Tabla 22. Es posible notar que la entrada de la dilución a escala de cluster ocurre en septiembre de 2006, es decir, 3 meses después de haber comenzado la extracción del cluster. Una vez que la dilución entra al cluster, se incrementa hasta llegar a oscilar en el 70% de dilución total cerca del final de la vida de éste.

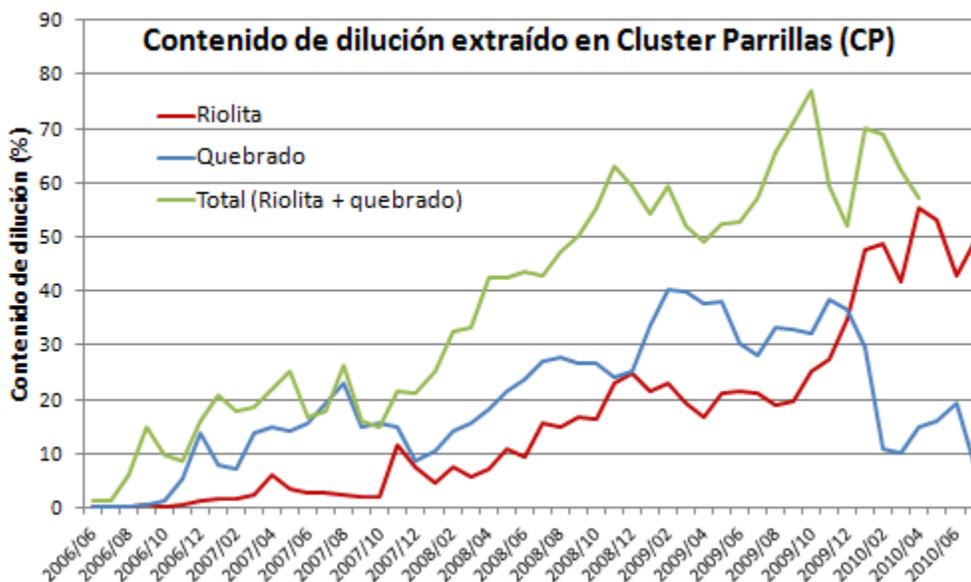


FIGURA 77: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO CLUSTER PARRILLAS

TABLA 22: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA CLUSTER PARRILLAS

| Estadísticas de dilución extraída Cluster Parrillas |              |                                |            |                                 |            |                                  |
|---|--------------|--------------------------------|------------|---------------------------------|------------|----------------------------------|
| Número de Puntos                                    |              | Riolita extraída (kt, mensual) |            | Quebrado extraído (kt, mensual) |            | Entrada dilución cluster (fecha) |
| Con Extracción                                      | Con dilución | Media                          | Desv. Est. | Media                           | Desv. Est. |                                  |
| 148   | 147          | 13.1                           | 11.4       | 25.0                            | 17.4       | sep-06                           |
| Área (m <sup>2</sup> )                              |              | 11988                          | 11907      |                                 |            |                                  |

El porcentaje de uniformidad para los puntos de extracción del cluster se muestra en una vista en planta en la Figura 79. En términos generales, los puntos de extracción del sector muestran bajos porcentajes de uniformidad (el 70% de los puntos posee un porcentaje de uniformidad bajo el 60%). La Figura 79 muestra el histograma y las estadísticas del porcentaje de uniformidad para los puntos de extracción del Cluster Parrillas. El porcentaje de uniformidad promedio para estos puntos es 63%, lo que indica que la extracción se realiza de manera poco uniforme en el cluster.

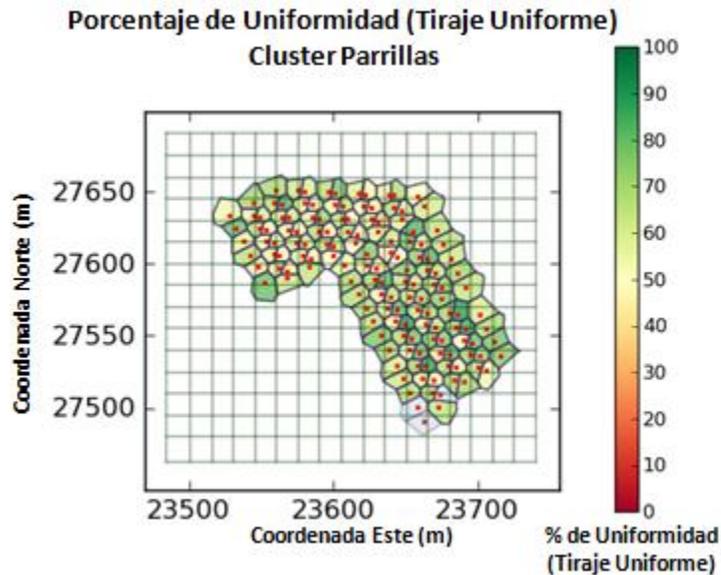


FIGURA 78: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) CLUSTER PARRILLAS

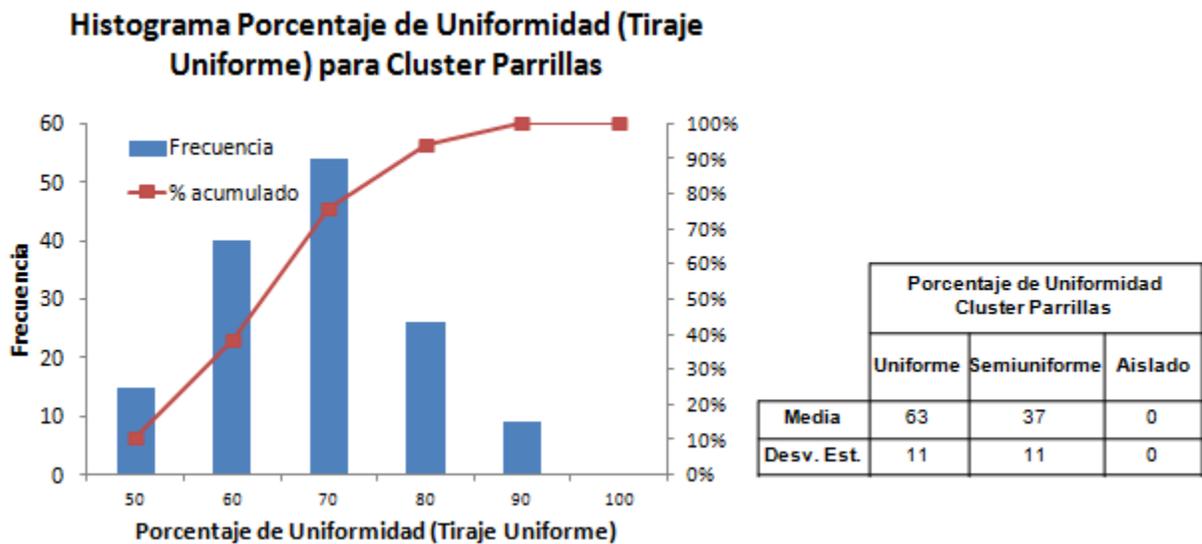


FIGURA 79: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) PARA CLUSTER PARRILLAS

Para analizar la entrada de dilución a nivel de puntos de extracción, se utilizan los 2 marcadores geológicos presentes en Andina (quebrado y riolita) a través de los índices PEQ(3%) y PER(3%) definidos en la sección 5.1. La Figura 80 ilustra el PEQ(3%) para los puntos de extracción del Cluster Parrillas junto con las curvas de nivel del quebrado en una vista en planta. Es posible apreciar en ella que, a pesar de que sólo una pequeña porción de los puntos se ubica debajo del material quebrado, el cluster completo se encuentra afectado por la entrada temprana de la dilución. De esta manera, no existe otra posibilidad más que esta entrada temprana de dilución en los puntos que no se encuentran bajo la sombra de quebrado se deba al arrastre lateral de este material desde los paneles contiguos explotados con anterioridad al cluster. La Figura 81 ilustra un perfil donde se observa el fenómeno.

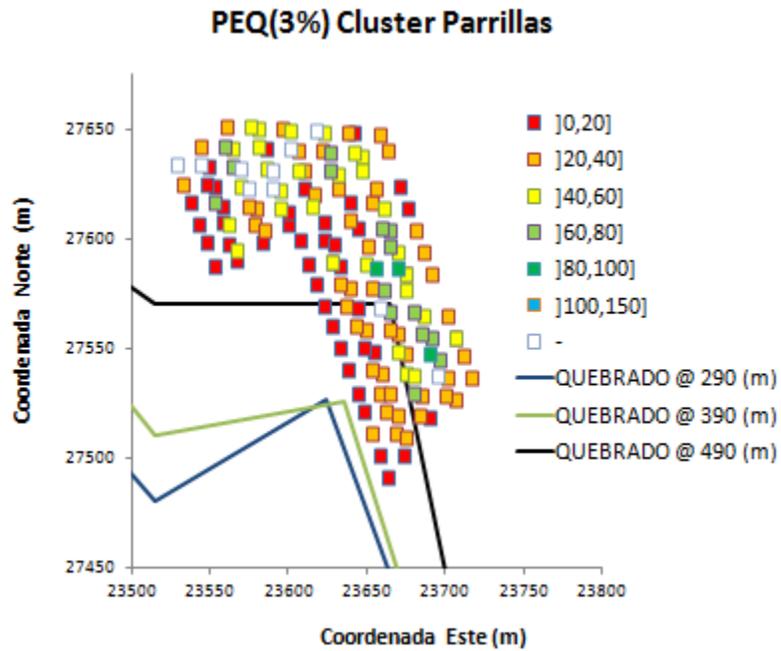


FIGURA 80: VISTA EN PLANTA PEQ(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE CLUSTER PARRILLAS Y CURVAS DE NIVEL DE QUEBRADO

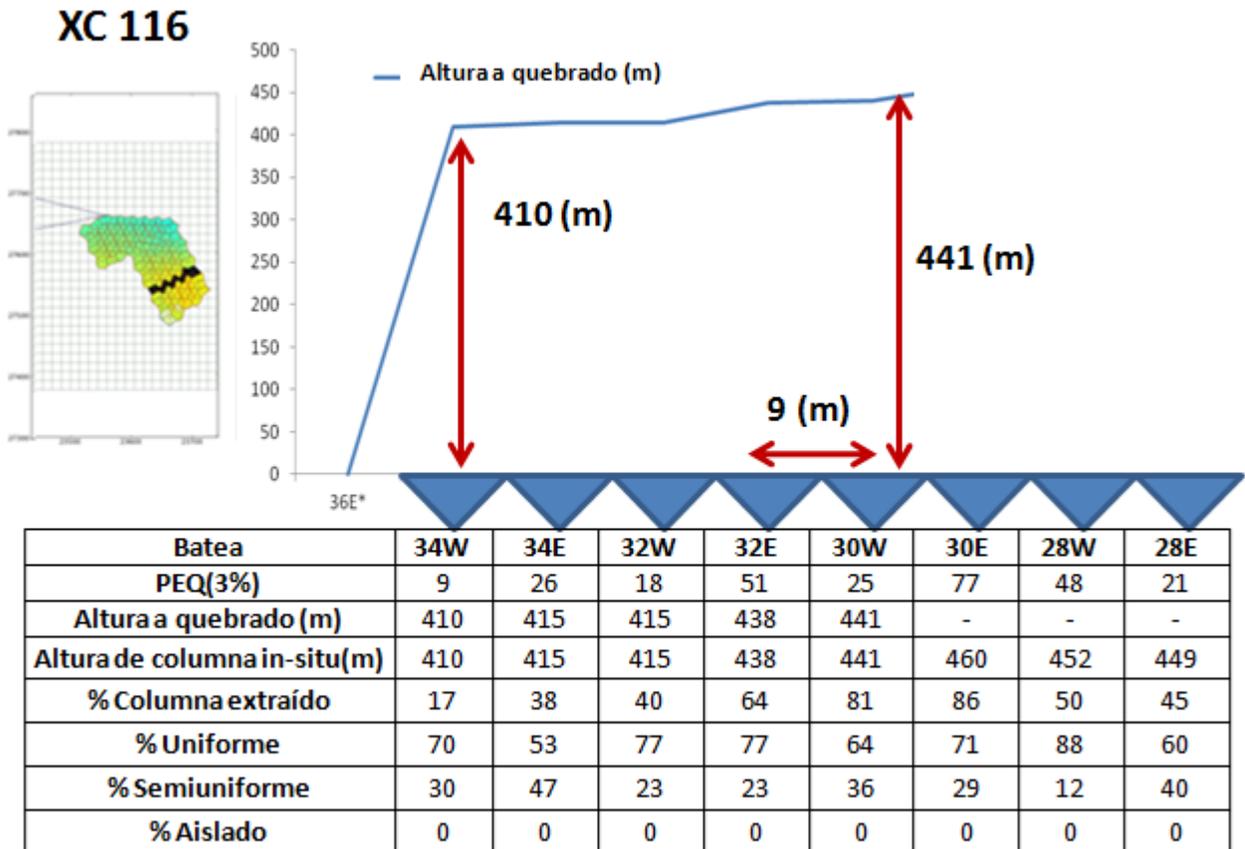


FIGURA 81: PERFIL CRUZADO 116 DE CLUSTER PARRILLAS DONDE SE OBSERVAN PUNTOS DE EXTRACCIÓN SIN SOMBRA DE QUEBRADO CON PEQ(3%) BAJO. LA BATEA 36E CORRESPONDE AL PANEL COLINDANTE AL CLUSTER EXPLOTADO ENTRE 2001 Y 2003

La Figura 82 muestra el PER(3%) junto con las curvas de nivel de la chimenea riolítica para los puntos de extracción del Cluster Parrillas en una vista en planta. En ella es posible apreciar que la entrada de riolita para los puntos que se encuentran al norte de la curva de nivel de la chimenea riolítica a 400 (m), podría deberse al descenso directo en forma vertical desde ésta.

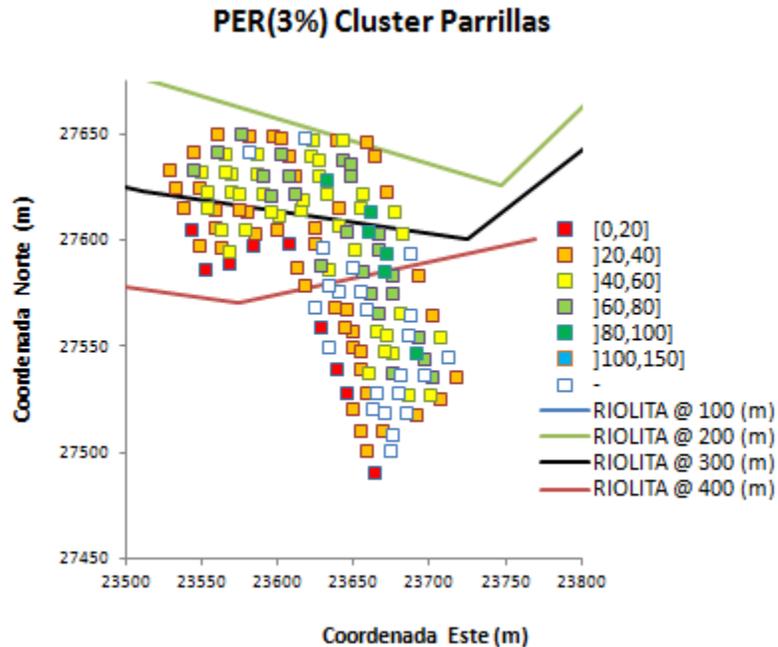


FIGURA 82: VISTA EN PLANTA PER(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE CLUSTER PARRILLAS Y CURVAS DE NIVEL DE RIOLITA

Por otra parte, para los puntos ubicados al sur de la curva de nivel de riolita a 400 (m), existe una relación entre el PEQ(3%) y el PER(%) (Figura 83). Por lo tanto, es posible suponer que la riolita presente en aquellos puntos de extracción hizo su ingreso al cluster mezclada con el quebrado que provino de los paneles aledaños explotados previamente.

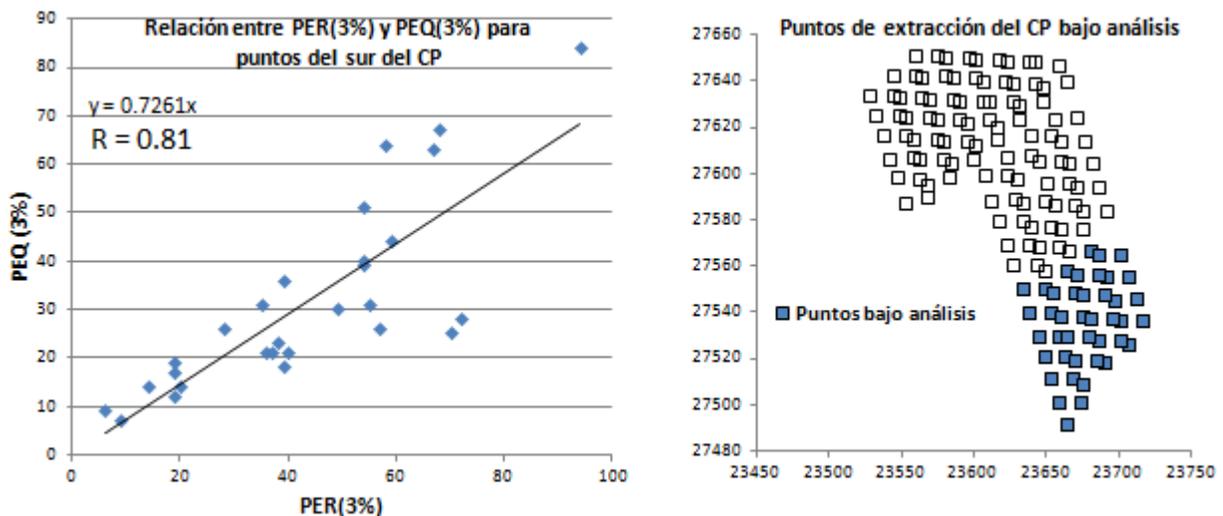


FIGURA 83: RELACIÓN ENTRE PER(3%) Y PEQ(3%) PARA PUNTOS DEL SUR DEL CLUSTER PARRILLAS

El PEQ(3%) promedio para los puntos de extracción del CP es 33% con una desviación estándar de 21%, mientras que el PER(3%) promedio es 46% con una desviación estándar de 18%.



FIGURA 84: CONTENIDO DE QUEBRADO EXTRAÍDO POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO CLUSTER PARRILLAS

La Figura 84 muestra el contenido de quebrado extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PEQ (3%)). Es posible apreciar que el contenido de quebrado extraído es igual si se consideran todos los puntos del sector o si se consideran sólo los puntos de extracción con entrada de dilución declarada.

### 5.3.2 Cluster LHD

La información de extracción del Cluster LHD (CL) cuenta con 397 puntos con extracción desde enero de 2006 a enero de 2012. Las estadísticas e información de la extracción con respecto a las leyes de Cu y toneladas extraídos del sector se presentan en la Figura 85 y en la Tabla 23.

Las alturas de columna in-situ del CL se calculan de igual forma que las del CP y se muestran en una vista en planta en la Figura 86a. Es posible apreciar que las columnas bajo 250 (m) en la zona sureste del cluster corresponden a aquellas que se encuentran debajo de la proyección del quebrado proveniente del Panel II, mientras que las columnas bajo 300 (m) en el noreste del cluster se encuentran debajo de la proyección de la chimenea riolítica. La secuencia de extracción ilustrada en la Figura 86b comienza en el sureste del cluster y avanza hacia el noroeste. Además, se observa que el panel contiguo al cluster ubicado al sureste de éste comienza su extracción en 2005, lo cual no representa un salto temporal importante con respecto al comienzo de la extracción en el CL.

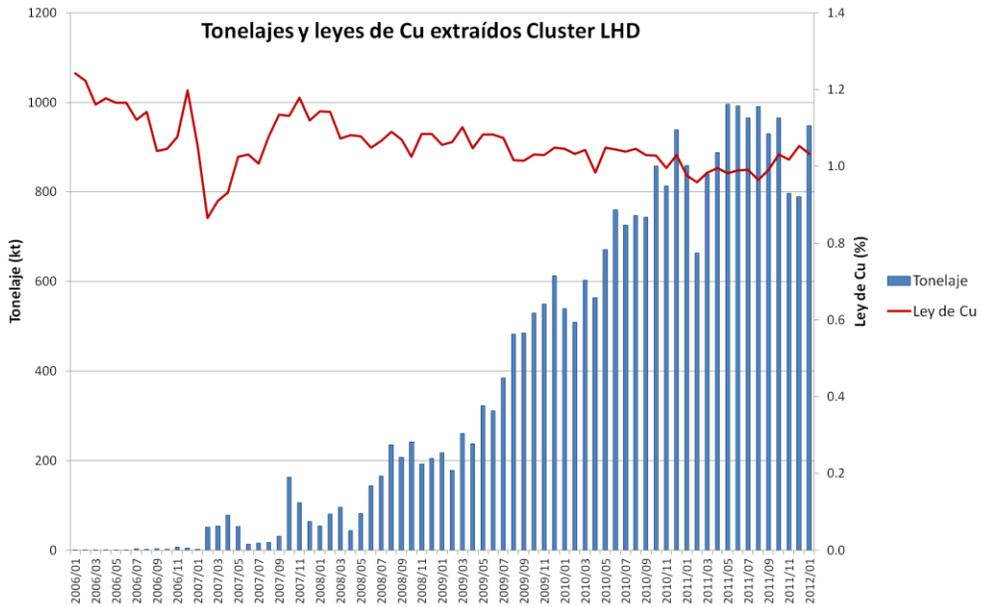


FIGURA 85: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS CLUSTER LHD

TABLA 23: ESTADÍSTICAS DE EXTRACCIÓN DE TONELAJES Y LEYES DE CU CLUSTER LHD

| Estadísticas de extracción de tonelajes y leyes Cluster LHD |       |                                 |            |                                |            |                            |                              |
|---|-------|---------------------------------|------------|--------------------------------|------------|----------------------------|------------------------------|
| Número de puntos  |       | Tonelaje extraído (kt, mensual) |            | Ley de Cu extraída (% mensual) |            | Número de períodos (meses) | Tonelaje total extraído (Mt) |
| Con extracción  | Total | Media                           | Desv. Est. | Media                          | Desv. Est. |                            |                              |
| 397   | 397   | 371                             | 353        | 1.1                            | 0.1        | 94                         | 27.1                         |

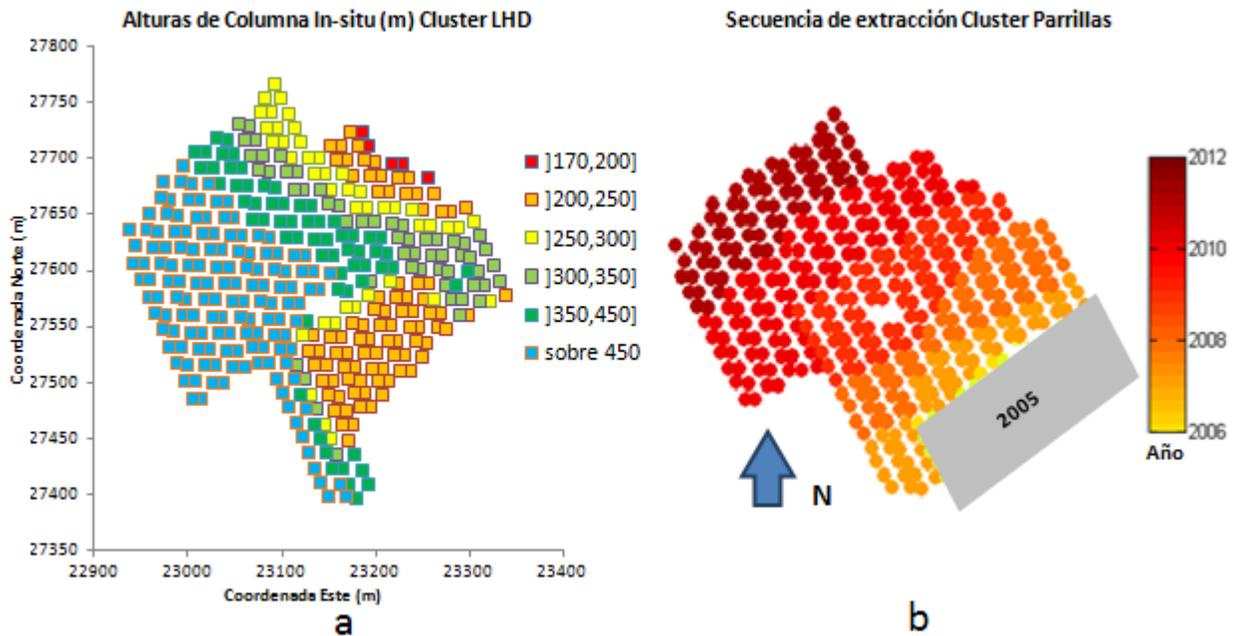


FIGURA 86: VISTAS EN PLANTA DE PUNTOS DE PRODUCCIÓN DE CLUSTER LHD, DONDE SE MUESTRAN: A) ALTURAS DE COLUMNA IN-SITU, Y B) SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

La información y estadísticas de la dilución extraída en términos de material quebrado y riolita para el CL se presentan en la Figura 87 y en la Tabla 24. Es posible notar que la entrada de la dilución a escala de cluster ocurre en octubre de 2006, es decir, 10 meses después de haber comenzado la extracción del cluster. Una vez que el quebrado entra al cluster se observa el peak mayor que no alcanza el 10%, luego de éste ocurre un proceso de entrada gradual de material proveniente del Panel II. En el caso de la riolita, la entrada es mucho más tardía y gradual.

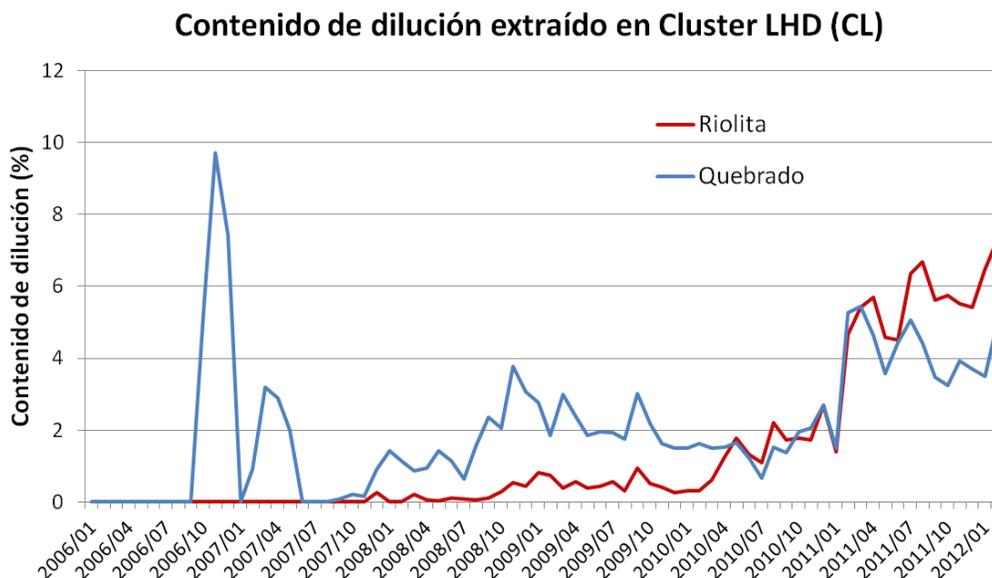


FIGURA 87: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO EN CLUSTER LHD

TABLA 24: ESTADÍSTICAS DE DILUCIÓN EXTRAÍDA CLUSTER LHD

| Estadísticas de dilución extraída Cluster LHD |              |                                |            |                                 |            |                                     |
|---|--------------|--------------------------------|------------|---------------------------------|------------|-------------------------------------|
| Número de Puntos                              |              | Riolita extraída (kt, mensual) |            | Quebrado extraído (kt, mensual) |            | Entrada de dilución cluster (fecha) |
| Con Extracción                                | Con dilución | Media                          | Desv. Est. | Media                           | Desv. Est. |                                     |
| 397   | 167          | 10.4                           | 18.5       | 10.0                            | 13.5       | oct-06                              |
| Área (m <sup>2</sup> )                        | 81107        | 32773                          |            |                                 |            |                                     |

El porcentaje de uniformidad para los puntos del Cluster LHD se presenta en una vista en planta en la Figura 88. Es posible apreciar que el sector este del cluster posee una mayor uniformidad que el oeste, sin embargo, en general el 80% de los puntos de extracción posee una uniformidad mayor al 70%. El histograma y las estadísticas de uniformidad para estos puntos se presentan en la Figura 89. Es posible apreciar que el porcentaje de uniformidad promedio en tiraje uniforme es de 84%, lo que indica que existe un cuidado de la uniformidad en términos de toneladas con la cual se realiza la extracción de los puntos del cluster.

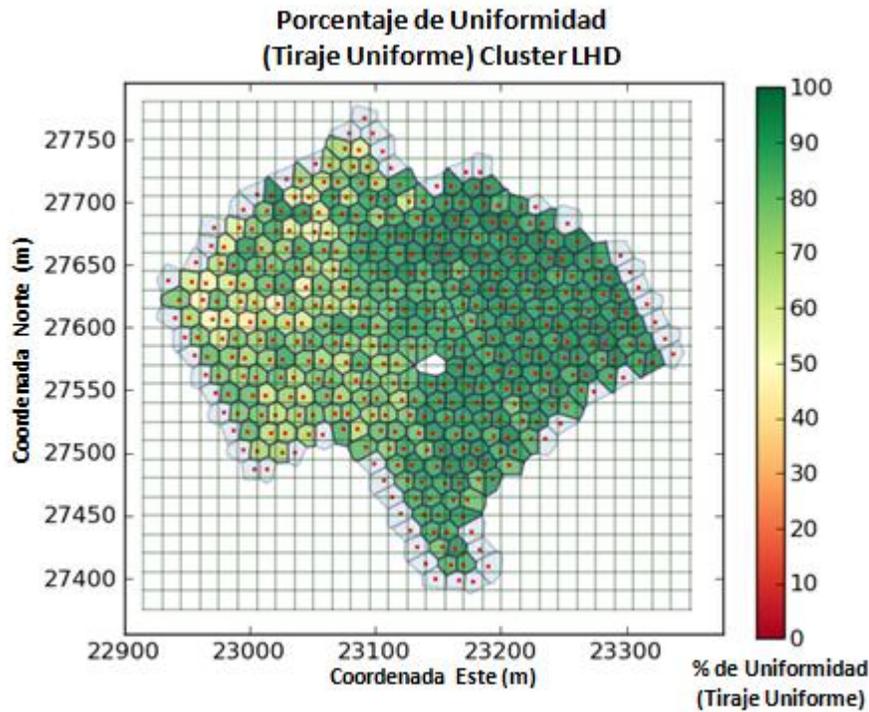


FIGURA 88: VISTA EN PLANTA DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD (EN TIRAJE UNIFORME) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE CLUSTER LHD

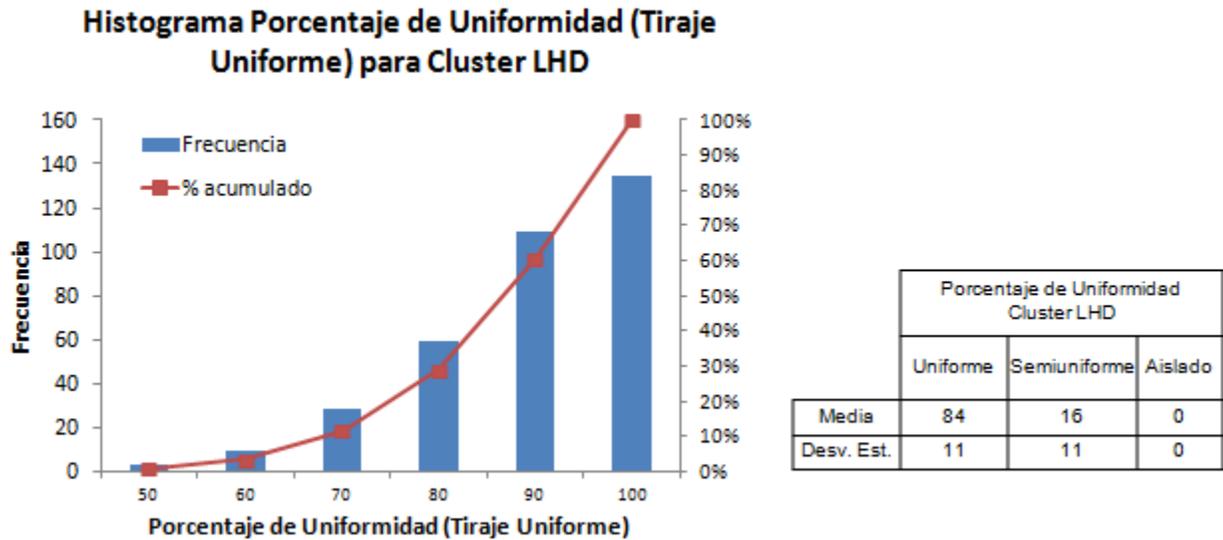


FIGURA 89: HISTOGRAMA Y ESTADÍSTICAS DE PORCENTAJE DE UNIFORMIDAD PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DEL CLUSTER LHD

El punto de entrada de quebrado declarado al 3% del contenido de quebrado acumulado (PEQ(3%)) junto con las curvas de nivel del quebrado se muestran en una vista en planta en la Figura 90. Es posible apreciar que prácticamente la totalidad de los puntos de extracción con entrada de quebrado declarada se ubican debajo de la proyección del material quebrado. El promedio del PEQ(3%) para los puntos con entrada de quebrado declarada es de 72% con una desviación estándar de 40%, lo que junto con lo expuesto anteriormente indica que probablemente el quebrado ingresa de manera vertical desde el Panel II ubicado en la parte superior.

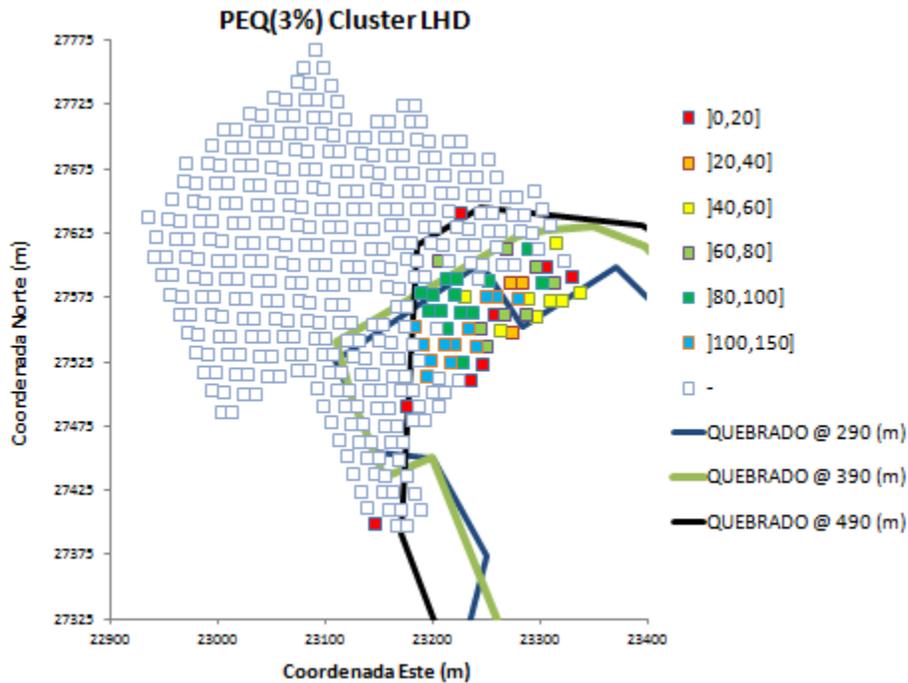


FIGURA 90: VISTA EN PLANTA PEQ(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DEL CLUSTER LHD Y CURVAS DE NIVEL DE QUEBRADO

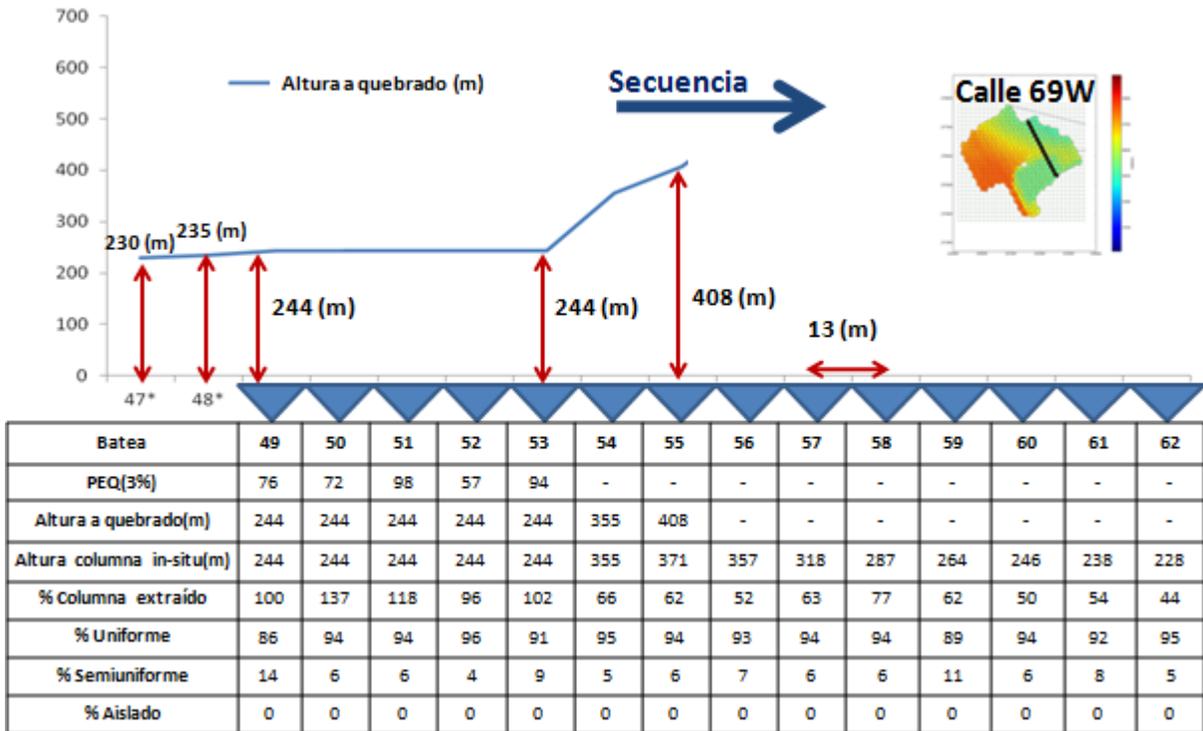


FIGURA 91: PERFIL DE LA CALLE 69W DEL CLUSTER LHD. LAS BATEAS 47 Y 48 CORRESPONDEN AL PANEL CONTIGUO QUE COMIENZA SU EXTRACCIÓN EN 2005.

La Figura 91 ilustra un perfil de la calle 69W del Cluster LHD, donde se observa que los puntos de extracción ubicados debajo de la proyección del quebrado poseen entrada de quebrado declarada sobre el 57%.

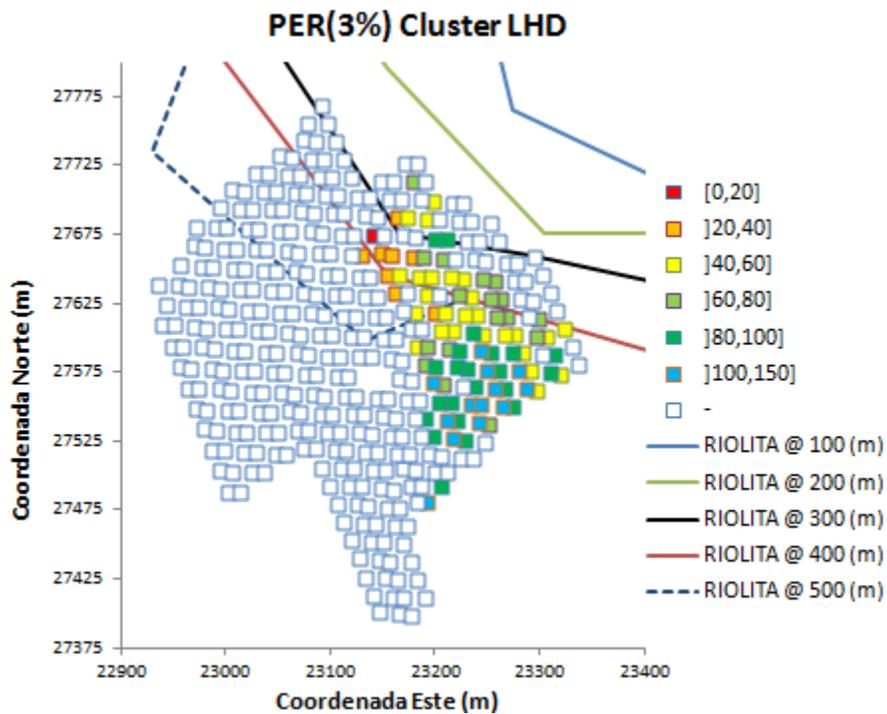


FIGURA 92: VISTAS EN PLANTA PER(3%) PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE CLUSTER LHD Y CURVAS DE NIVEL DE QUEBRADO

El punto de entrada de riolita declarado al 3% del contenido acumulado de riolita para los puntos de extracción del Cluster LHD junto con las curvas de nivel de la riolita se muestran en una vista en planta en la Figura 92. Se aprecia en la figura que los puntos que se ubican al sureste de la última curva de la proyección de riolita poseen una entrada tardía de riolita declarada a pesar de no encontrarse directamente debajo de la chimenea. La Figura 93 muestra la relación que existe entre el PER(3%) y el PEQ(3%) para estos puntos, lo que indica que la riolita entra mezclada en el quebrado proveniente del Panel II para esta zona del cluster. De esta manera, es posible asumir que la riolita en la zona norte del cluster (ubicada debajo de la proyección de la chimenea riolítica) entra de manera vertical desde la chimenea riolítica, mientras que en los puntos del sureste entra de manera vertical desde el quebrado del Panel II.

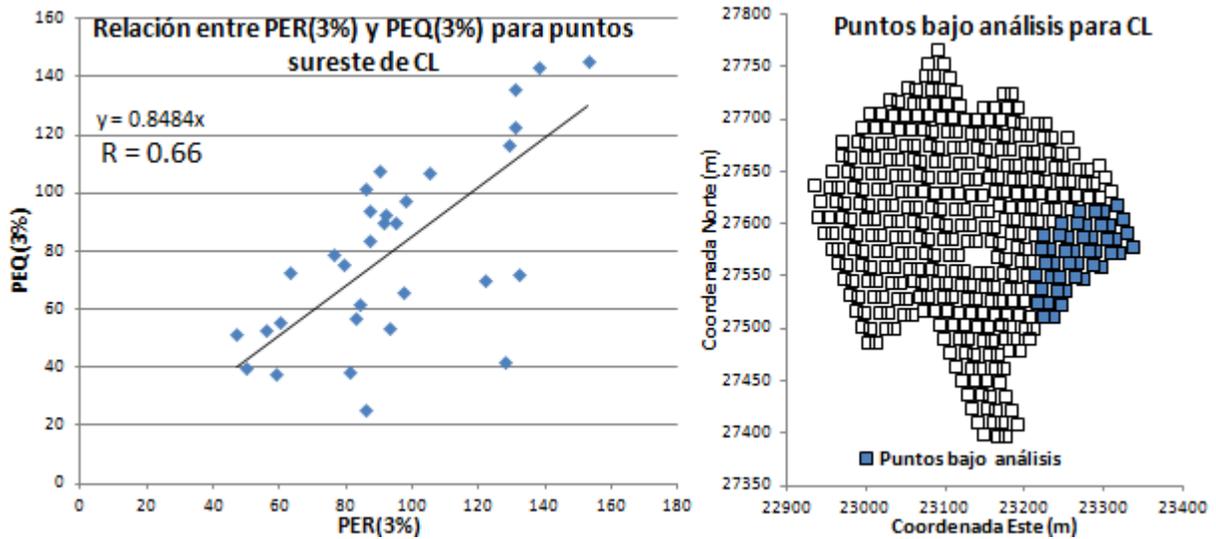


FIGURA 93: RELACIÓN ENTRE PER(3%) Y PEQ(3%) PARA PUNTOS DE EXTRACCIÓN DEL SURESTE DEL CLUSTER LHD



FIGURA 94: CONTENIDO DE QUEBRADO EXTRAÍDO POR PUNTOS CON ENTRADA DE DILUCIÓN DECLARADA CON EL CRITERIO DEL 3% ACUMULADO CLUSTER LHD

La Figura 94 muestra el contenido de quebrado extraído a nivel de plan de producción para los puntos de extracción con entrada de dilución declarada a través del criterio del 3% acumulado (PEQ (3%)). Es posible apreciar que, al igual que para el Cluster Parrillas, el contenido de quebrado extraído es igual si se consideran todos los puntos del sector o si se consideran sólo los puntos de extracción con entrada de dilución declarada.

### 5.3.3 Resumen hipótesis de entrada de dilución en Andina

De manera de simplificar el resumen de hipótesis, la Figura 95 ilustra las áreas correspondientes a los clusteres de dilución de Andina. La Tabla 25 resume las hipótesis de entrada de dilución formuladas para las áreas de los clusteres de dilución de Andina. La Tabla 26 resume los principales índices del análisis.

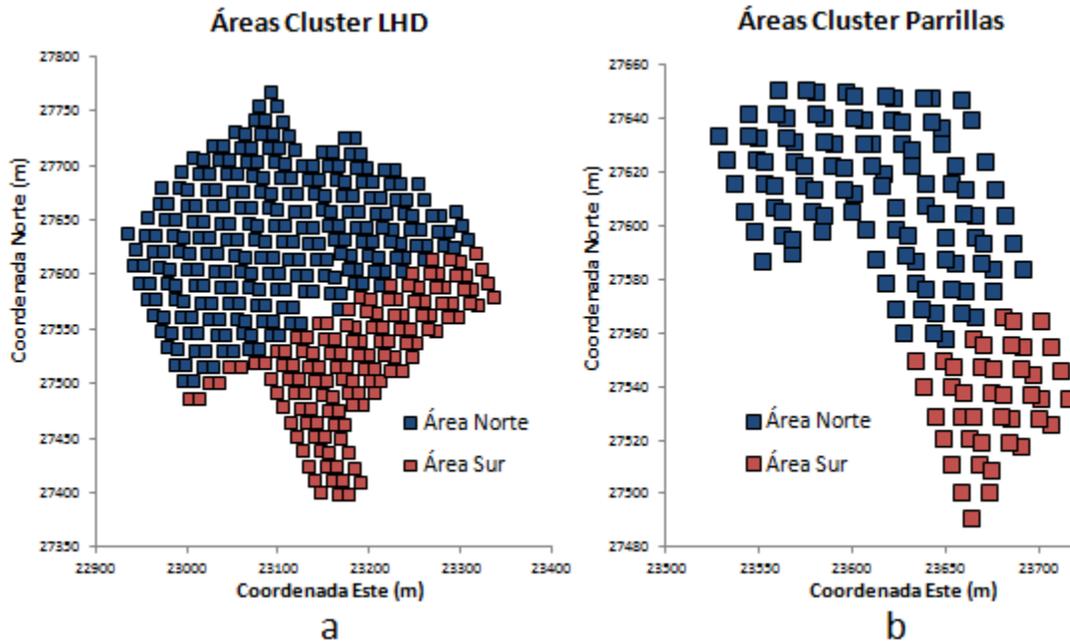


FIGURA 95: VISTAS EN PLANTA ÁREAS DE CLUSTERES ANDINA, DONDE SE MUESTRA: A) ÁREAS DE CLUSTER LHD, Y B) ÁREAS DE CLUSTER PARRILLAS

TABLA 25: RESUMEN DE HIPÓTESIS DE ENTRADA DE DILUCIÓN EN ANDINA

|                   |            | Hipótesis de entrada de dilución   |   |
|-------------------|------------|--|---|
|                   |            | Riolita  | Quebrado  |
| Cluster LHD       | Área Norte | Entrada <b>vertical</b> desde chimenea riolítica                           | (No hay entrada declarada)                                |
|                   | Área Sur   | Entrada <b>vertical</b> desde material quebrado (mezclado en quebrado)     | Entrada <b>vertical</b> desde quebrado de sector anterior |
| Cluster Parrillas | Área Norte | Entrada <b>vertical</b> desde chimenea riolítica                           | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente       |
|                   | Área Sur   | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente (mezclado en quebrado) | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente       |

TABLA 26: RESUMEN ÍNDICES DE ANÁLISIS DE DILUCIÓN ANDINA

| Cluster de dilución Andina | Área  | Alturas de columna in-situ | Porcentaje de Uniformidad (Tiraje Uniforme) | PEQ(3%)   | PER(3%)   |
|----------------------------|-------|----------------------------|---|-----------|-----------|
|                            |       | (m)                        | (%)   | (%)       | (%)       |
| LHD                        | Norte | 422 ± [127]                | 82 ± [12]                                   | -         | 54 ± [18] |
|                            | Sur   | 331 ± [121]                | 89 ± [6]                                    | 73 ± [40] | 90 ± [28] |
| Parrillas                  | Norte | 290 ± [62]                 | 62 ± [10]                                   | 33 ± [21] | 41 ± [23] |
|                            | Sur   | 433 ± [22]                 | 68 ± [11]                                   | 32 ± [19] | 43 ± [22] |

#### 5.4 HIPÓTESIS DE MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN

Luego del análisis de los datos de dilución de El Salvador y Andina, es posible plantear como hipótesis los siguientes mecanismos de entrada de la dilución en los sectores:

- Entrada de dilución debida a desplazamiento vertical:  
 Cuando la fuente de dilución se ubica sobre el panel a explotar y existe una propagación regular del cave back hacia ella, la dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical. Este es el caso de los sectores Inca Central Oeste de El Salvador y el Cluster LHD de Andina. La Figura 96 ilustra el mecanismo a través de una secuencia conceptual de perfiles.
- Entrada de dilución debida a desplazamiento lateral:  
 Cuando el panel en cuestión se ubica al costado de un sector previamente explotado, a medida que su secuencia avanza, el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire suficientemente grande para permitir el ingreso de material quebrado y el ángulo de la pila de material granular permite el flujo lateral del material, éste se trasladará hasta los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado. Este es el caso de los sectores Inca Central Este e Inca Norte de El Salvador y el Cluster Parrillas de Andina. La Figura 97 ilustra el mecanismo a través de una secuencia conceptual de perfiles.
- Entrada de dilución posterior a un evento de colgadura del cave back:  
 Si el radio hidráulico del área inicial abierta no es suficiente para propagar el caving, ocurrirá un colgadura del cave back. Si habiendo ocurrido esto, se continúa la extracción del área abierta sin incorporar más área, el vacío generado por la extracción no se llenará de material fragmentado y se acumulará un bolsón de aire. Una vez que se incorpore área nueva a la extracción, el cave back se propagará de manera repentina y la dilución ubicada encima del panel explotado ingresará a los puntos de extracción luego de un estallido de aire. Este es el caso del sector Inca Oeste de El Salvador. La Figura 98 ilustra el mecanismo a través de una secuencia de perfiles en el sector Inca Oeste.

El factor determinante en todas las hipótesis de los mecanismos de entrada de dilución anteriormente descritas es la forma en que el cave back se propaga debido a las condiciones de borde de la ubicación de la fuente de dilución y la estrategia de

extracción adoptada con respecto a ésta. Este factor predomina por sobre la uniformidad en términos de tonelaje con la cual se realice la extracción de los puntos del sector.

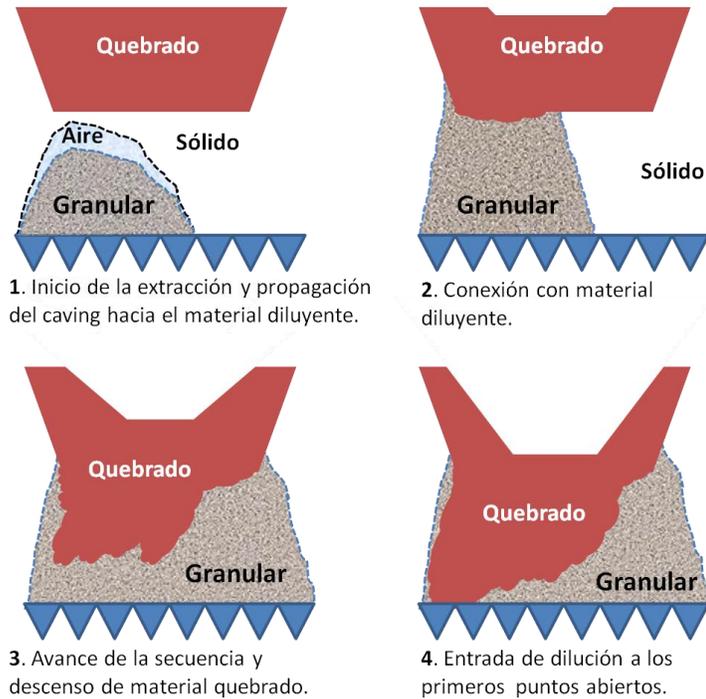


FIGURA 96: PERFILES CONCEPTUALES DE SECUENCIA DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN VERTICAL

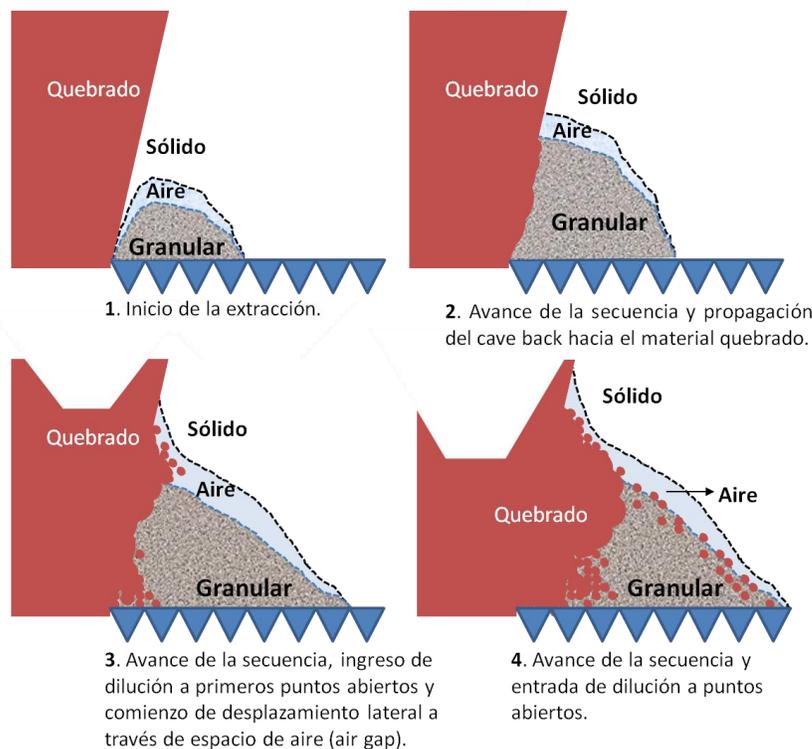


FIGURA 97: PERFILES CONCEPTUALES DE SECUENCIA DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN LATERAL

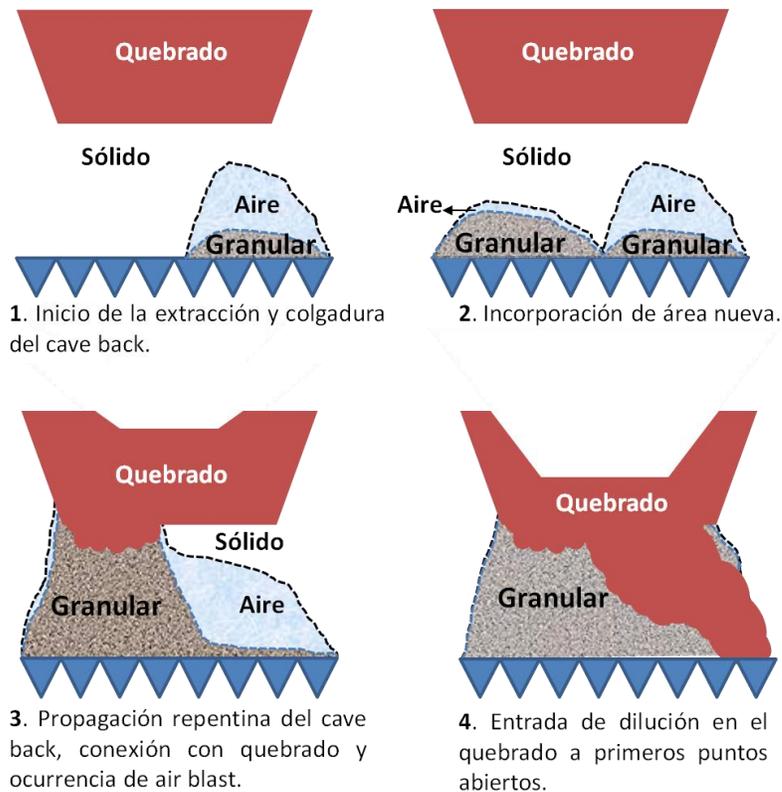


FIGURA 98: PERFILES CONCEPTUALES DE SECUENCIA DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN POSTERIOR A UN EVENTO DE COLGADURA (ADAPTADO DE DE NICOLA Y FISHWICK, 2000)

## 5.5 VARIABLES QUE CONTROLAN LOS MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN

A través del análisis anteriormente expuesto, es posible afirmar que la entrada de dilución en una operación de panel caving puede ocurrir de manera vertical o lateral. De esta manera, las variables que afectan la entrada de dilución en un punto de extracción son las que definen el desplazamiento del material diluyente en los mecanismos y son, por lo tanto, muchas más que las consideradas por los actuales modelos de dilución. En este capítulo se presentan las relaciones entre estas variables y se propone un modelo para la estimación del punto de entrada de dilución medio para un sector determinado.

Como se enuncia anteriormente, dadas las condiciones iniciales de un sector, existirá un potencial de dilución lateral y/o vertical. El primero, ocurrirá durante la fase en quiebre del panel y dependerá de la formación de un espacio de aire generado sobre la pila de material granular que permita el ingreso del diluyente a ésta desde una fuente ubicada al costado del sector. Luego, si el ángulo de la pila entre los puntos de extracción es superior al ángulo de reposo del material diluyente, éste podrá viajar hasta los puntos recientemente abiertos. Por otro lado, si el ángulo de la pila es inferior al ángulo de reposo, el material sólo podrá percolar a través de la pila descendiendo de manera vertical. El segundo, ocurrirá una vez que se haya alcanzado la conexión con el material diluyente encima del sector y su ocurrencia dependerá de la percolación del diluyente a través de la pila. De esta forma, los fenómenos que dan origen a los mecanismos de entrada de dilución lateral y vertical pueden agruparse en tres:

- La formación de un espacio de aire sobre la pila.

- El escurrimiento de material diluyente sobre la pila.
- La percolación de material diluyente a través de la pila.

Además, dado un sector determinado, existen ciertas condiciones iniciales que favorecerán la entrada de dilución, tales como la cantidad de mineral en contacto con las fuentes de dilución y la diferencia entre las alturas columnas in-situ, que favorecerá la mezcla lateral de dilución.

### 5.5.1 Formación de un espacio de aire y desplazamiento lateral de la dilución durante el quiebre

Durante la fase en quiebre, a medida que el cave back se propaga, se formará un espacio de aire si la altura de la pila de extracción ( $H_P$ ) es menor que la altura del cave back ( $H_{CB}$ ) para un área determinada.  $H_P$  se relaciona con la altura extraída ( $H_{EX}$ ),  $H_{CB}$  y la razón de vacíos ( $e$ ), definida como la razón entre el volumen de vacíos y el volumen sólido, de la siguiente manera:

$$H_P [m] = (H_{CB} [m] - H_{EX} [m]) \cdot (1 + e)$$

ECUACIÓN 18: ALTURA DE LA PILA HP EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE CAVE BACK, ALTURA EXTRAÍDA Y RAZÓN DE VACÍOS

Por otra parte, la altura extraída puede escribirse en función de la velocidad de extracción ( $V_{EX}$ ), la densidad del mineral sólido ( $\rho_s$ ) y el tiempo ( $t$ ), como:

$$H_{EX} [m] = \frac{V_{EX} \left[ \frac{t}{m^2 \cdot día} \right]}{\rho_s \left[ \frac{t}{m^3} \right]} \cdot tiempo [días]$$

ECUACIÓN 19: ALTURA DE EXTRACCIÓN EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN, LA DENSIDAD DE SÓLIDO Y EL TIEMPO

Además, la altura de cave back es una función de su tasa de propagación vertical ( $V_{CP}$ ) y el tiempo:

$$H_{CB} [m] = V_{CP} \left[ \frac{m}{día} \right] \cdot tiempo [días]$$

ECUACIÓN 20: ALTURA DE CAVE BACK EN FUNCIÓN DE LA TASA DE PROPAGACIÓN VERTICAL Y EL TIEMPO

De esta forma, la formación del espacio de aire para un momento determinado durante la fase en quiebre ocurrirá si  $H_{CB}$  es mayor que  $H_P$ . Es decir, si se cumple la siguiente condición:

$$V_{EX} \left[ \frac{t}{m^2 \cdot día} \right] > V_{CP} \left[ \frac{m}{día} \right] \cdot \frac{e}{1 + e} \cdot \rho_s \left[ \frac{t}{m^3} \right]$$

ECUACIÓN 21: CONDICIÓN PARA LA FORMACIÓN DE UN ESPACIO DE AIRE SOBRE LA PILA

Por otra parte, una vez formado el espacio de aire, si la pendiente local entre las alturas de pila de 2 bateas contiguas en la dirección de la secuencia ( $\beta$ ) es mayor que el ángulo de fricción del material diluyente ( $\phi$ ), la dilución podrá trasladarse de manera lateral sobre la pila. De manera simplificada, el retraso entre el comienzo de la producción de las 2 bateas contiguas puede estimarse en función de la tasa de incorporación de área ( $V_D$ ), el ancho del frente de extracción ( $W$ ), la distancia entre las bateas ( $d$ ) y el ángulo de azimut del footprint ( $\delta$ ) (Figura 99), como:

$$\text{Retraso}[\text{días}] = \frac{W[m] \cdot d[m] \cdot \cos(\delta)}{V_D \left[ \frac{m^2}{\text{día}} \right]}$$

ECUACIÓN 22: RETRASO EN LA ENTRADA EN PRODUCCIÓN DE 2 BATEAS CONTIGUAS EN EL SENTIDO DE LA SECUENCIA

Así, durante el quiebre, la diferencia entre las alturas de las pilas de extracción de 2 bateas contiguas en el sentido de la secuencia que posean la misma tasa de propagación vertical del cave back ( $\Delta h_p$ ) será:

$$\Delta h_p[m] = \left( V_{CP} \left[ \frac{m}{\text{day}} \right] - \frac{V_{EX} \left[ \frac{t}{m^2 \cdot \text{day}} \right]}{\rho_s \left[ \frac{t}{m^3} \right]} \right) \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{W[m] \cdot d[m] \cdot \cos(\delta)}{V_D \left[ \frac{m^2}{\text{day}} \right]}$$

ECUACIÓN 23: DIFERENCIA ENTRE LAS ALTURAS DE LAS PILAS DE EXTRACCIÓN DE 2 BATEAS CONTIGUAS EN EL SENTIDO DE LA SECUENCIA

Luego, la pendiente local entre las alturas de pila de 2 bateas contiguas en la dirección de la secuencia ( $\beta$ ) será:

$$\beta[^\circ] = \tan^{-1} \left( \left( V_{CP} \left[ \frac{m}{\text{day}} \right] - \frac{V_{EX} \left[ \frac{t}{m^2 \cdot \text{day}} \right]}{\rho_s \left[ \frac{t}{m^3} \right]} \right) \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{W[m] \cdot \cos(\delta)}{V_D \left[ \frac{m^2}{\text{day}} \right]} \right)$$

ECUACIÓN 24: PENDIENTE LOCAL ENTRE 2 ALTURAS DE PILA DE BATEAS CONTIGUAS EN FUNCIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS Y GEOMECÁNICOS

De esta forma, el material diluyente podrá migrar por encima de la pila de extracción si se cumple que:

$$\tan(\beta) > \tan(\phi)$$

ECUACIÓN 25: CONDICIÓN PARA LA MIGRACIÓN LATERAL DEL MATERIAL DILUYENTE

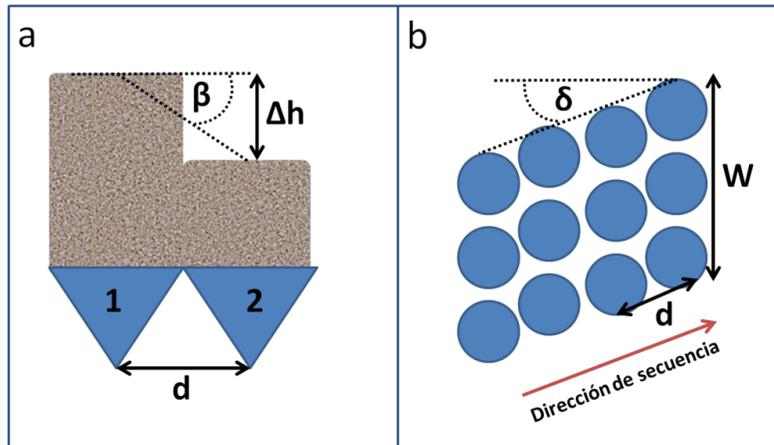


FIGURA 99: A) PERFIL CONCEPTUAL DE PENDIENTE ENTRE LAS ALTURAS DE PILA DE 2 BATEAS CONTIGUAS; B) VISTA EN PLANTA CONCEPTUAL DE SECUENCIA DE EXTRACCIÓN

### 5.5.2 Cantidad de mineral expuesto a diluirse y diferencias entre alturas de columna

Las condiciones iniciales con respecto a las fuentes de dilución que posee un panel previo a su explotación definirán en gran medida la entrada de la dilución. Mientras mayor sea la superficie de mineral en contacto con las fuentes de dilución (tanto lateral como vertical), mayor será el potencial de entrada de dilución y viceversa. De esta manera, si la razón entre el volumen de mineral y el área de la superficie de contacto entre el material diluyente y el mineral ( $R_{OD}$ , en metros) es mayor, el potencial de dilución será menor y la entrada de dilución será más tardía. Por otro lado, si las diferencias entre las alturas de columna de un sector son mayores, existirá un mayor potencial de dilución y la entrada de dilución será más temprana. Un indicador de la diferencia entre las alturas de columna en un sector es la desviación estándar de éstas ( $h_{SD}$ , en metros).

### 5.5.3 Tasa de percolación y uniformidad de la extracción en régimen

Una vez realizada la conexión con el nivel superior donde se encuentra el material quebrado, la entrada de dilución de manera vertical quedará controlada por la tasa de descenso del material diluyente. Esta tasa dependerá de la capacidad del material diluyente para percolar a través de la pila y de la manera en que se realice la extracción. Mientras más uniforme sea el tiraje en esta etapa, más tardía será la entrada de la dilución. Un indicador de la uniformidad con que se realiza el tiraje durante esta etapa es el índice de uniformidad de Susaeta (2004) ( $IU$ ). Por otra parte, mientras menor sea el tamaño característico del material diluyente ( $d_w$ , en metros) con respecto al del mineral ( $d_o$ , en metros), mayor será la tasa de percolación de la dilución dentro de la pila y, por lo tanto, más temprana será la entrada de la dilución.

### 5.5.4 Factores adimensionales de los fenómenos de entrada de dilución

A través de un análisis adimensional es posible agrupar las variables anteriormente descritas según el fenómeno que representan con respecto a la entrada de la dilución. La Tabla 27 muestra las variables agrupadas en factores adimensionales por fenómeno en la entrada de dilución. Es importante destacar que los factores están contruidos de manera que mientras mayores sean sus valores, más tardía será la entrada de dilución.

TABLA 27: FACTORES ADIMENSIONALES AGRUPADOS POR FENÓMENO EN LA ENTRADA DE DILUCIÓN

| Fenómeno en la entrada de dilución                    | Factor adimensional  |
|---|--|
| Potencial de dilución debido a condiciones iniciales  | $\frac{R_{OD}}{h_{SD}}$                                    |
| Formación de air gap para ingreso de dilución         | $\frac{V_{CP} \cdot e \cdot \rho_S}{V_{EX} \cdot (1 + e)}$ |
| Potencial de desplazamiento de dilución sobre la pila | $\frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)}$                           |
| Descenso vertical de dilución a través de la pila     | $\frac{d_O}{d_W} \cdot IU$                                 |

Utilizando estos factores, es posible plantear modelos predictivos del punto de entrada de dilución basados en los fenómenos que dan origen a los mecanismos de entrada del material diluyente para un sector determinado. Un ejemplo de modelo determinístico puede corresponder al siguiente:

$$PED[\%] = \left( \frac{V_{CP} \cdot e \cdot \rho_S}{V_{EX} \cdot (1 + e)} \right)^a \cdot \left( \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)} \right)^b \cdot \left( \frac{R_{OD}}{h_{SD}} \right)^c \cdot \left( \frac{d_O}{d_W} \cdot IU \right)^d$$

ECUACIÓN 26: MODELO DE PUNTO DE ENTRADA DE DILUCIÓN MEDIO PARA UN SECTOR BASADO EN LOS MECANISMOS DE ENTRADA DE DILUCIÓN

Esta fórmula agrupa las variables que determinan los mecanismos de entrada de dilución, sin embargo, la información disponible no permite realizar una calibración para obtener los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ . Independiente de aquello, los factores adimensionales propuestos sientan una base concreta para poder contar con una herramienta de predicción del punto de entrada de dilución más realista que las aproximaciones hasta ahora publicadas una vez que se colecte la información de varias operaciones y se calibren los parámetros de éste u otro modelo propuesto.

# CAPÍTULO 6

---

## COMPARACIÓN DE HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE FLUJO GRAVITACIONAL REBOP CON DATOS DE MINAS

El presente capítulo contiene un estudio de comparación de la herramienta de simulación de flujo gravitacional REBOP con datos de operaciones de CODELCO-Chile, esta comparación se realiza tanto a escala de puntos de extracción como de sectores productivos, con el objetivo de establecer:

- La capacidad de REBOP para reproducir el tonelaje asignado por las cartas de extracción.
- La capacidad de REBOP para reproducir las leyes extraídas.
- La capacidad de REBOP para reproducir la entrada de dilución (estimada a través de los marcadores geológicos).
- Los parámetros de entrada que posean los menores errores de reproducción junto con los errores asociados en términos de tonelajes, leyes y entrada de dilución.

La metodología con la cual se lleva a cabo el estudio y la base de datos utilizada para éste se presentan en el Capítulo 3 y 4, respectivamente. De esta manera, el presente capítulo se divide en cuatro secciones principales, las que consideran:

- Revisión práctica de REBOP como herramienta de simulación.
- Definición de él o los índices de comparación a utilizar en la comparación de REBOP.
- Simulación y comparación de la extracción histórica de los sectores seleccionados con distintos sets de parámetros determinados en base a la revisión práctica y a la información disponible.
- Conclusiones y recomendaciones acerca de la precisión de REBOP para la simulación de flujo de material quebrado en minas de block/panel caving incluyendo entrada de dilución a nivel de sector y de puntos de extracción.

### 6.1 REVISIÓN PRÁCTICA DE REBOP

El objetivo de la revisión práctica REBOP es establecer, a través de un análisis de sensibilidad, la influencia que poseen las principales variables de entrada incluidas en

REBOP sobre el comportamiento del flujo simulado. Para ello, la revisión se divide en un análisis para tiraje aislado (extracción de 1 solo punto) y otro para tiraje múltiple.

### 6.1.1 Tiraje aislado

De manera de estudiar la influencia de los parámetros de entrada de REBOP sobre el flujo de un punto aislado, se calcula la geometría de la zona de movimiento aislada (IMZ) resultante para distintas simulaciones variando las propiedades del material y las condiciones de borde. La Figura 100 indica las condiciones bajo las cuales se realizan las simulaciones. La sobrecarga se mide como la altura de material sobre el límite de la IMZ, el ancho de carguío se refiere al ancho del punto de extracción.



FIGURA 100: PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES DE TIRAJE AISLADO

Los principales resultados obtenidos forman parte del trabajo de comparación de REBOP con datos de minas realizado por el Laboratorio Block Caving de la Universidad de Chile (Castro y Paredes, 2012) y se encuentran en el Anexo A.

### 6.1.2 Tiraje múltiple

La primera parte de los resultados de esta sección se obtienen del trabajo de tesis de Vargas (2010), donde se realizan simulaciones para un número limitado de puntos de extracción, teniendo como objetivo de comprender el rol de REBOP como una herramienta para evaluar el espaciamiento de puntos de extracción. Las simulaciones se realizan utilizando mallas tipo Teniente, donde sólo se varía el espaciamiento entre los puntos de extracción y se estima la recuperación primaria. En este caso, no se incluye un perfil de propagación del cave back y se realiza un tiraje uniforme. La Tabla 28 indica los resultados del ejercicio, donde se observa que la recuperación disminuye a medida que el espaciamiento aumenta, lo que indica que la lógica del flujo gravitacional simulado por REBOP es coherente con la teoría de flujo.

TABLA 28: SIMULACIÓN DE MATERIAL REMANENTE COMO FUNCIÓN DE ESPACIAMIENTO ENTRE PUNTOS (VARGAS, 2010)

| De/Dc  | Largo de zanja = 15 (m) |        |        | Largo de zanja = 18 (m) |        |        |
|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|        | 18 (m)                  | 20 (m) | 23 (m) | 18 (m)                  | 20 (m) | 23 (m) |
| 30 (m) | 6.673                   | 8.688  | 11.219 | 5.872                   | 7.618  | 10.417 |
| 32 (m) | 8.688                   | 8.861  | 14.892 | 7.186                   | 7.798  | 11.954 |
| 34 (m) | 7.696                   | 10.867 | 16.881 | 7.580                   | 10.091 | 13.964 |
| 36 (m) | 9.573                   | 12.821 | 19.621 | 8.836                   | 13.628 | 17.836 |

La segunda parte corresponde a la revisión de la influencia de la inclusión de la propagación del cave back en los resultados del flujo simulado en REBOP. Para ello, se simula el área de extracción inicial del sector Diablo Regimiento (correspondiente a 64 puntos de extracción) utilizando las superficies de propagación de cave back - calculadas por personal del área de Geomecánica de El Teniente a través de una metodología que utiliza información de los eventos sísmicos, el cráter de subsidencia y la extracción de los puntos del sector (Figura 101) hasta la fecha de conexión con el material quebrado - de manera de observar la influencia de la inclusión de éstas en la predicción de la entrada de dilución promedio en los puntos del área.

La Tabla 29 presenta la información de la extracción y las superficies de cave back para los sectores de El Teniente. Para estas simulaciones, el valor observado (en la mina) de la entrada de dilución en los puntos del área analizada corresponde al tonelaje extraído hasta la fecha en que se detecta en el punto el primer marcador artificial proveniente de un sector previamente explotado. Mientras que el valor simulado corresponde al tonelaje extraído hasta que aparece la primera tonelada de material quebrado marcado en el modelo de bloques. Además, se incluyen simulaciones para observar la influencia de la porosidad en el espacio de aire (air gap) generado.

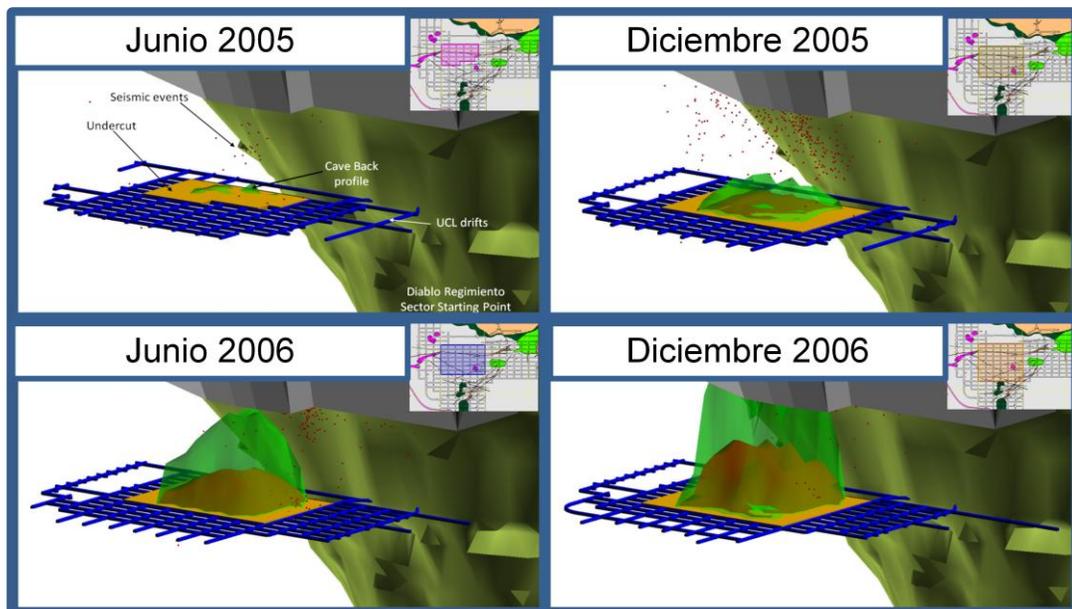


FIGURA 101: SUPERFICIES DE CAVE BACK PARA ÁREA INICIAL DE DIABLO REGIMIENTO, (CASTRO Y PAREDES, 2012)

TABLA 29: INFORMACIÓN DE EXTRACCIÓN Y PROPAGACIÓN DE CAVE BACK PARA SECTORES DE EL TENIENTE

| Sector | Información de extracción |             |         | Información de Cave Back |             |           |                  |
|--------|---------------------------|-------------|---------|--------------------------|-------------|-----------|------------------|
|        | Fecha de inicio           | Fecha final | Escala  | Fecha de inicio          | Fecha final | Escala    | Número de puntos |
| DR     | Jun-05                    | Nov-11      | Mensual | Jun-05                   | Dec-08      | Mensual   | 64               |
| ES     | Sep-97                    | Nov-11      | Mensual | Sep-97                   | Dec-99      | Mensual   | 93               |
| RN     | Jul-89                    | Nov-11      | Mensual | Dic-89                   | Jun-00      | Semestral | 149              |

La Tabla 30 muestra los parámetros simulados para el análisis de sensibilidad con la inclusión de la propagación del cave back y la porosidad. La Figura 102 y la Figura 103 muestran los resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad, en ellas se observa que la inclusión del perfil de propagación del cave back influye de manera significativa en el punto de entrada de dilución estimado en las simulaciones. Se observa también que al disminuir la porosidad aumenta el espacio del aire entre el cave back y la pila, sin embargo, esto no tiene un efecto significativo en la estimación de la entrada de dilución.

TABLA 30: SETS DE PARÁMETROS PARA ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE CAVE BACK Y POROSIDAD EN SIMULACIONES

| Set de parámetros | Ángulo de fricción (°) | Diámetro medio (m) | Dev. Est. (m) | Porosidad máxima (%) | Observación  |
|-------------------|------------------------|--------------------|---------------|----------------------|--|
| 1                 | 50                     | 1                  | 0.4           | 40%                  | Cada set se simula tanto para flujo granular como para flujo con propagación de cave back. |
| 2                 | 30                     | 1                  | 0.4           | 40%                  |  |
| 3                 | 30                     | 0.5                | 0.3           | 40%                  |  |
| 4                 | 30                     | 1.5                | 0.5           | 40%                  |  |
| 5                 | 50                     | 1                  | 0.5           | 34%                  | Porosidad ajustada al cave back  |
| 6                 | 50                     | 1                  | 0.5           | 20%                  | Sensibilidad para la porosidad   |
| 7                 | 50                     | 1                  | 0.5           | 10%                  | Sensibilidad para la porosidad   |

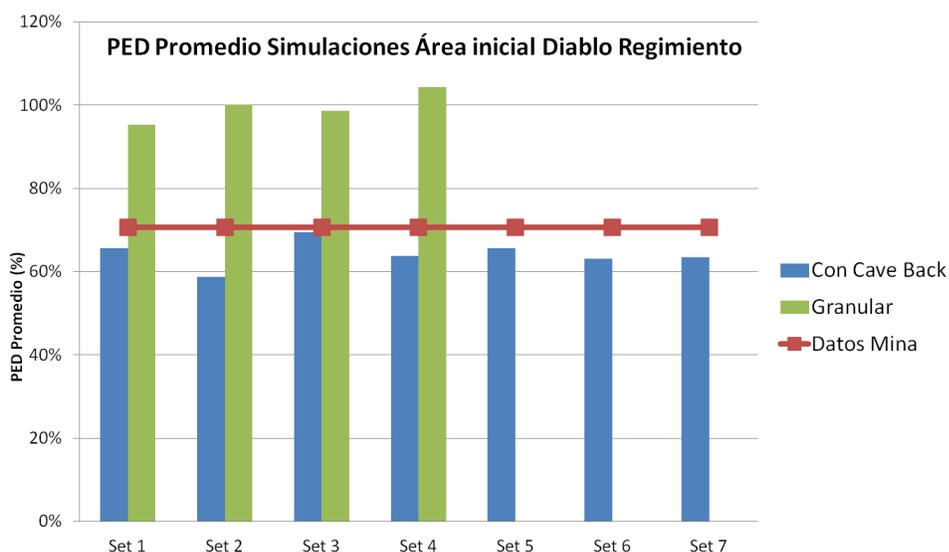


FIGURA 102: RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CAVE BACK Y POROSIDAD EN ÁREA INICIAL DE SECTOR DIABLO REGIMIENTO

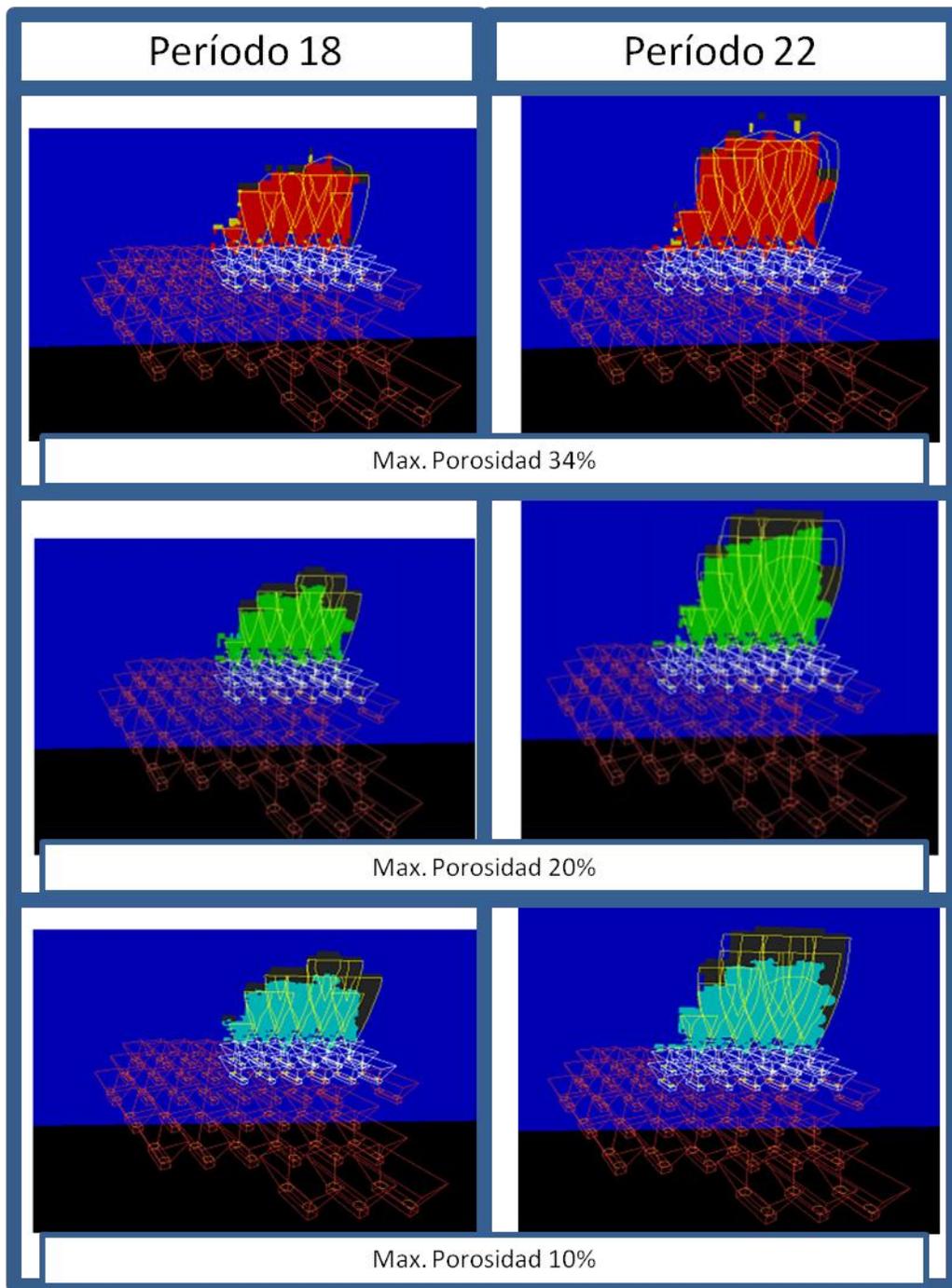


FIGURA 103: IMÁGENES DE RESULTADOS DE SENSIBILIDAD PARA POROSIDAD MÁXIMA EN ÁREA INICIAL DEL SECTOR DIABLO REGIMIENTO

### 6.1.3 Conclusiones y recomendaciones de la revisión práctica

La Tabla 31 presenta las conclusiones y recomendaciones de la revisión práctica.

TABLA 31: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE REVISIÓN PRÁCTICA DE REBOP, CASTRO Y PAREDES (2012)

|                 | Parámetro               | Variación                                   | Resultados REBOP  | Conclusiones y recomendaciones  |
|-----------------|-------------------------|---|---|---|
| Tiraje Aislado  | Fragmentación           | 0.001 - 5 (m)                               | La fragmentación influye en la geometría de la IMZ. Se observan variaciones cuantitativas al variar el tamaño medio de la fragmentación                                       | De acuerdo a IMZ experimentales, se recomienda utilizar la fragmentación en REBOP sólo como un indicador. Se debe utilizar un rango amplio de variación de fragmentación para calibrar.   |
|                 | Altura de extracción    | 0 - 200 (m)                                 | La altura de extracción influye en la geometría de la IMZ. Mientras mayor sea la altura de extracción, mayor es el radio de la IMZ.   | Construido en base a evidencia experimental.  |
|                 | Sobrecarga              | 0 - 300 (m)                                 | La sobrecarga no influye en la geometría de la IMZ.   | Es necesario investigar sobre este efecto.  |
|                 | Ancho de carguío        | 3.2 - 4 (m)                                 | No influye en la geometría de la IMZ.   | Debe ser incluido de acuerdo a condiciones de borde.  |
|                 | Geometría de la batea   | 25° - 90°                                   | No influye en la geometría de la IMZ.   | Debe ser incluido de acuerdo a condiciones de borde.  |
| Tiraje Múltiple | Mecanismos de Caving    | Flujo graular – Propagación de Cave Back    | El posible incluir tanto la propagación del cave back como la porosidad máxima. Mientras menor sea la porosidad, mayor será el air gap generado y la probabilidad de rilling. | En REBOP, la propagación del cave back influye en la predicción de la entrada de dilución. Este es un parámetro clave que debe ser incluido en la calibración aún cuando no se cuente con información de la operación acerca del cave back. |
|                 | Espaciamiento de puntos | 30x18 (m) - 36x23(m), d50=1(m)              | Mientras mayor sea el espaciamiento entre puntos, mayor es la altura de interacción.  | REBOP podría ser utilizado para evaluar espaciamiento de puntos.  |
|                 | Estrategia de tiraje    | De acuerdo al tiraje actual en Panel Caving | Es posible incluir cualquier estrategia de tiraje. Sin embargo, REBOP fue calibrado con experimentos en tiraje uniforme.  | REBOP debe ser validado usando modelamiento físico. En particular, para tiraje no simultáneo.   |

## 6.2 DEFINICIÓN DE ÍNDICES DE COMPARACIÓN

En esta sección se presentan los índices de comparación utilizados en la comparación de REBOP con los datos de operaciones de CODELCO-Chile.

### 6.2.1 Error cuadrático medio

Para el cálculo de la precisión con la cual la variable simulada (en REBOP) estima la variable observada (dato mina), se introduce el error cuadrático medio (Pielke, 1984) abreviado por su sigla en inglés, RMSE, a través de la Ecuación 14. Como puede inferirse de la ecuación, el RMSE posee la misma unidad de medida que la variable estudiada.

### 6.2.2 Error relativo medio

Como puede inferirse de la Ecuación 14, el RMSE posee la misma unidad de medida que la variable estudiada, por lo que se hace necesario contar con un índice construido en términos relativos, de manera de observar el comportamiento relativo de la variable simulada con respecto a la variable observada. Así, se define el error relativo medio como:

$$\text{Error relativo medio (\%)} = \frac{RMSE}{\sum_{i=1}^N \frac{V_{OBS}}{N}} \cdot 100$$

ECUACIÓN 27: ERROR RELATIVO MEDIO

### 6.2.3 Confiabilidad

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

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

ECUACIÓN 28: CONFIABILIDAD

Donde:

- S:  $\frac{\text{N}^\circ \text{ de puntos CON entrada de marcador geológico declarada tanto en datos mina como en la simulación}}{\text{N}^\circ \text{ de puntos con entrada de marcador geológico declarada en datos mina}}$
- N:  $\frac{\text{N}^\circ \text{ de puntos SIN entrada de marcador geológico declarada tanto en datos mina como en la simulación}}{\text{N}^\circ \text{ de puntos SIN entrada de marcador geológico declarada en datos mina}}$

## 6.3 SIMULACIÓN DE EXTRACCIÓN HISTÓRICA DE SECTORES Y COMPARACIÓN CON DATOS MINA

### 6.3.1 Comparación con sectores de El Teniente

La información y estadísticas de extracción de leyes y tonelajes para El Teniente se presentan en la Tabla 8. La Figura 122 en el Anexo B muestra los tonelajes y leyes de cobre extraídos para el sector Diablo Regimiento (DR), cuya información de extracción comienza en enero de 2005 (donde se extrae la primera tonelada) y termina en noviembre de 2011. Sin embargo, el comienzo oficial de la extracción del sector ocurre en junio de 2006. La Figura 123 en el Anexo B muestra las toneladas y leyes de cobre extraídas para el sector Esmeralda (ES), cuya extracción va de septiembre de 1997 a noviembre de 2011. La Figura 124 en el Anexo B muestra las toneladas y leyes de cobre extraídas para el sector Reservas Norte (RN), cuya extracción comienza en julio de 1989 hasta noviembre de 2011. Es importante destacar que entre mayo de 1992 y noviembre de 1993, se detiene la extracción del sector debido a eventos de estallidos de roca.

La Tabla 29 muestra la información de la propagación del cave back en los sectores de El Teniente, en ella es posible apreciar que ésta información sólo se encuentra disponible para las áreas iniciales de los sectores entre la fecha de apertura de éstos hasta la fecha de conexión con el quebrado de los sectores superiores previamente explotados. De esta manera, para simular la extracción histórica completa de los sectores con el perfil de cave back, como se recoge de las conclusiones encontradas en la etapa de revisión práctica, se define una relación ( $k_1$ ) entre la altura del cave back ( $H_{CB}$ ) y la extracción acumulada en un punto de extracción ( $T_{cum}$ ) de la siguiente manera:

$$H_{CB} = k_1 \cdot T_{cum}$$

ECUACIÓN 29: RELACIÓN ENTRE ALTURA DE CAVE BACK (HCB) Y EXTRACCIÓN ACUMULADA (TCUM)

O equivalentemente para la altura equivalente extraída ( $H_{ex}$ ):

$$H_{CB} = k_2 \cdot H_{ex}$$

ECUACIÓN 30: RELACIÓN ENTRE ALTURA DE CAVE BACK (HCB) Y ALTURA EQUIVALENTE EXTRAÍDA (HEX)

Donde  $k_2$  depende de  $k_1$ , la densidad de la roca in-situ ( $\rho_s$ ) y el área de influencia del punto de extracción ( $A_i$ ), de la siguiente forma:

$$k_2 = k_1 \cdot A_i \cdot \rho_s$$

ECUACIÓN 31: RELACIÓN ENYTRE K1 Y K2

La Figura 104 muestra la relación que existe para los 3 sectores entre la extracción y la altura de cave back calculada desde el UCL hasta la superficie correspondiente. La Tabla 32 muestra las razones  $k_1$  y  $k_2$  calculadas para los sectores de El Teniente. Estas razones se utilizan para asignar las superficies de cave back a las simulaciones de los

puntos de extracción de los sectores. La Tabla 33 muestra los parámetros para las simulaciones de extracción histórica de los sectores de El Teniente.

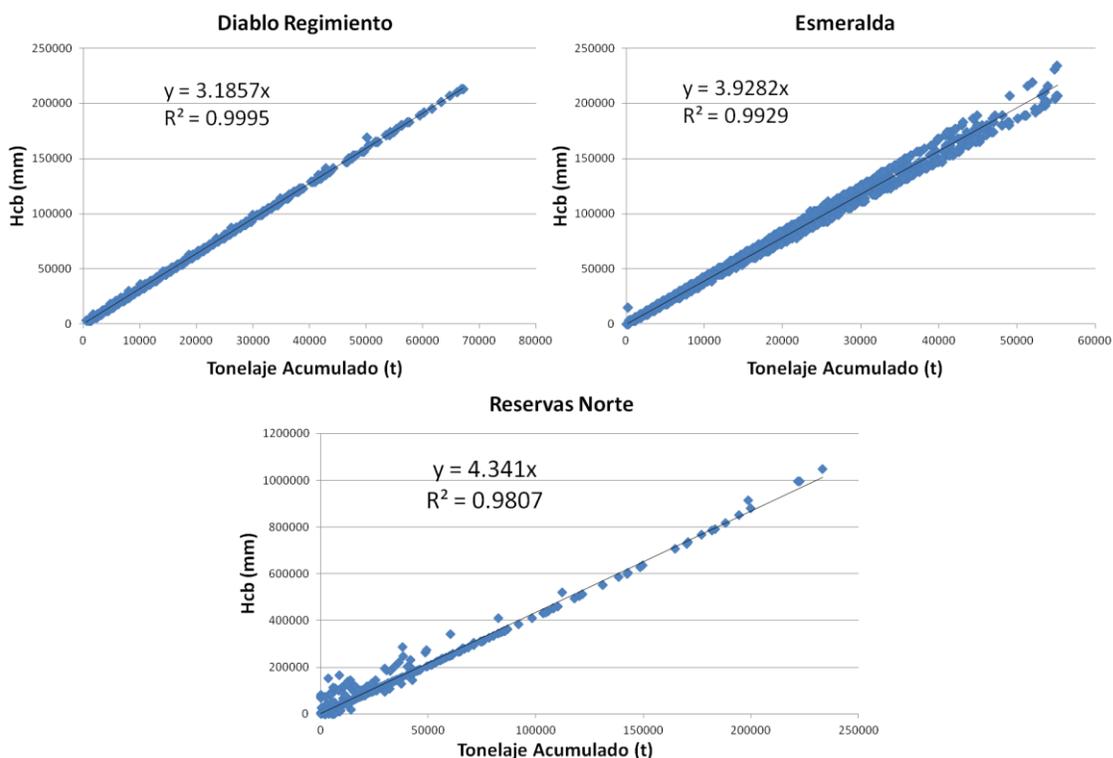


FIGURA 104: RELACIONES ENTRE ALTURA DE CAVE BACK Y TONELAJE ACUMULADO PARA SECTORES DE EL TENIENTE

TABLA 32: RELACIONES K1 Y K2 CALCULADAS PARA SECTORES DE EL TENIENTE

| Sector            | $k_1$ (mm/t) | Malla            | Área de influencia (m <sup>2</sup> ) | Densidad in-situ (t/m <sup>3</sup> ) | $k_2$ (m/m) |
|-------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Diablo Regimiento | 3.19         | Teniente 34 x 20 | 340                                  | 2.76                                 | 3.0         |
| Esmeralda         | 3.93         | Teniente 30 x 20 | 300                                  | 2.6                                  | 3.1         |
| Reservas Norte    | 4.34         | Teniente 30 x 20 | 300                                  | 2.62                                 | 3.4         |

TABLA 33: PARÁMETROS SIMULACIONES DE SECTORES EL TENIENTE

| Sector | $k_2$ (m/m) | Ángulo de fricción (°) | Diámetro medio (m) | Desv. Est. diámetro (m) | Porosidad máxima (%) | Observación   |
|--------|-------------|------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|---|
| DR     | 3.0         | 50°                    | 1                  | 0.5                     | 34%                  | Se calcula la porosidad para ajustarse al cave back |
| ES     | 3.1         | 50°                    | 1                  | 0.5                     | 34%                  |   |
| RN     | 3.4         | 50°                    | 1                  | 0.5                     | 29%                  |   |

El detalle de los resultados de la comparación de REBOP con los datos de El Teniente se encuentra en el Anexo B, Sección B.1.

De acuerdo a los resultados, incorporando el perfil de propagación del cave de los datos de la mina, REBOP es capaz de reproducir el flujo a escala de plan de producción con

un error relativo medio menor al 7% en términos de tonelajes (1.7% para el mejor caso) y menor al 17% en términos de leyes de cobre (7% para el mejor caso) en los sectores de El Teniente.

### **6.3.2 Comparación con sectores de El Salvador**

La comparación de REBOP con los sectores de El Salvador se realiza en dos escalas, primero se compara la capacidad reproductiva de la herramienta en términos de tonelajes, leyes y entrada de dilución (fecha) a nivel de sector, y luego en términos de punto de entrada de dilución (PED(3%)) a nivel de puntos de extracción. Para la comparación de entrada de dilución a nivel de sector se considera la suma de la dilución extraída por los puntos de extracción con entrada de dilución declarada bajo el criterio del 3% del contenido de dilución acumulado (PED(3%)), tanto para el dato mina como para la simulación correspondiente.

El Salvador posee una base de datos robusta de la limonita como dilución estimada en los puntos de extracción. El modelo de bloques cuenta con la categorización de bloques según tipo de roca (incluyendo el quebrado), sin embargo, no existe en la información una medida del contenido de limonita en cada bloque. Por lo tanto, para efectos de estimar la dilución en las simulaciones se utiliza el quebrado como marcador geológico.

Se construyen cuatro sets de parámetros diferentes en términos de tamaño de fragmentación e inclusión de la propagación del cave back para las simulaciones de la extracción histórica de los sectores de El Salvador. Debido a que la base de datos de El Salvador no cuenta con mediciones del avance del cave back, se utiliza la relación empírica  $k_2 = 3$  (m/m), es decir, por cada metro extraído, el cave back se propaga 3 metros. La Tabla 34 muestra los parámetros utilizados en las simulaciones de El Salvador.

TABLA 34: SETS DE PARÁMETROS PARA SIMULACIONES DE SECTORES EL SALVADOR

|       | Nombre de la simulación | K <sub>2</sub> | Fragmentación      |                         | Porosidad Máxima (%) | Ángulo de fricción (°) | Observación  |
|-------|-------------------------|----------------|--------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|--|
|       |                         |                | Diámetro medio (m) | Desv. Est. diámetro (m) |                      |                        |  |
| Set 1 | Caso Base               | 3              | 1                  | 0.5                     | 33%                  | 50°                    | Fragmentación gruesa para todos los bloques y relación 1 a 3 entre altura extraída y quebrada. |
| Set 2 | Flujo Granular          | NO             | 1                  | 0.5                     | 33%                  | 50°                    | Fragmentación gruesa para todos los bloques y sin restricción de cave back.                    |
| Set 3 | Fragmentación Fina      | 3              | 0.01               | 0.005                   | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para todos los bloques y relación 1 a 3 entre altura extraída y quebrada.   |
| Set 4 | Fragmentación Fina (FG) | NO             | 0.01               | 0.005                   | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para todos los bloques y sin restricción de cave back.                      |

Los resultados de las simulaciones de El Salvador pueden verse en detalle en el Anexo B, Sección B.2.

La Tabla 35 resume la comparación de la entrada de dilución en las simulaciones con los datos mina en función de los comportamientos observados en la mina (Tabla 19). En general, es posible afirmar que utilizando la razón entre altura extraída y altura quebrada 1 a 3 las simulaciones sólo son capaces de reproducir cualitativa y cuantitativamente el mecanismo de entrada de dilución vertical (ICW) para los sectores de El Salvador.

TABLA 35: RESUMEN ANÁLISIS DE ENTRADA DE QUEBRADO EN PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE SIMULACIONES EL SALVADOR

|   |  | Sector   |  |  |    |
|---|--|--|--|--|----|
|   |  | ICE  | ICW  | IN   | IW |
| <b>Análisis de entrada de dilución (quebrado) en simulaciones El Salvador</b> | El análisis de la entrada de la dilución en las simulaciones estimada a través del PEQ(3%) muestra que las simulaciones de fragmentación gruesa tienden a sobrestimar la entrada de dilución para los puntos del norte y el centro del sector, y para los puntos del sur, no muestran entrada de dilución al igual que en los datos minas. |  |  | En términos generales, REBOP reproduce las leyes, tonelajes y entrada de dilución a escala de plan de producción.  |    |
|   | Esto permite concluir que las simulaciones no son capaces de reproducir el mecanismo de entrada lateral para los puntos del centro y sólo reproducen la entrada vertical del material quebrado.  | En términos generales, las simulaciones con fragmentación gruesa reproducen las leyes, tonelajes y entrada de dilución en términos de la confiabilidad y el error relativo medio del sector. | La simulación con fragmentación gruesa y propagación de cave back muestra altos PEQ(3%) para los puntos del sur, bajos PEQ(3%) para la zona central y altos PEQ(3%) para la zona norte, lo cual representa un comportamiento cualitativamente similar a lo observado en la mina. Sin embargo, la simulación tiende a sobrestimar el PEQ(3%) para la mayoría de los puntos. | Las simulaciones no incluyen la colgadura del cave back durante el inicio de la secuencia. De esta manera, el punto de entrada de dilución a escala de plan de producción simulado no reproduce la realidad. Las otras variables simuladas (leyes y tonelajes) son reproducidas por la simulación de fragmentación gruesa en flujo granular. |    |

### 6.3.3 Comparación con Panel III de Andina

Al igual que con El Salvador, la comparación de REBOP con los datos de Andina se realiza en dos escalas, probando primero la capacidad reproductiva de la herramienta en términos de tonelajes y leyes con la extracción histórica del Panel III completo a escala de plan de producción, y luego, la entrada de quebrado y riolita (fecha) a nivel de plan de producción y el punto de entrada de dilución (PEQ(3%) y PER(3%)) a nivel de puntos de extracción para los clusteres de dilución. Para la comparación de entrada de dilución a nivel de sector se considera la suma de la dilución extraída por los puntos de extracción con entrada de dilución declarada bajo el criterio del 3% del contenido de dilución acumulado (PEQ(3%) y PER(3%)), tanto para el dato mina como para la simulación correspondiente.

Luego del análisis de datos presentado en el Capítulo 5, es claro que la mayor diferencia entre el Panel III y el resto de los sectores analizados, es el hecho de que existan 2 tipos de roca (primario y secundario) en las columnas in-situ. De manera de considerar este hecho en las simulaciones de REBOP, a los cuatro sets de parámetros utilizados en las simulaciones de El Salvador, se adicionan dos sets con fragmentación diferenciada. Estos sets consideran fragmentación gruesa para los bloques correspondientes a roca primaria y fragmentación fina para los bloques correspondientes a roca secundaria en el modelo de bloques. La diferencia entre estos dos sets es que uno se construye incluyendo la propagación del cave back con un  $k_2 = 3$  (m/m) (3 metros quebrados por cada metro extraído), mientras que el otro se construye en flujo granular (sin restricción de cave back). La Tabla 36 muestra los sets de parámetros para las simulaciones del Panel III de Andina.

TABLA 36: SETS DE PARÁMETROS PARA SIMULACIONES PANEL III

|       | Nombre de la simulación         | $K_2$ | Fragmentación      |                         | Porosidad Máxima (%) | Ángulo de fricción (°) | Observación   |
|-------|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|---|
|       |                                 |       | Diámetro medio (m) | Desv. Est. diámetro (m) |                      |                        |   |
| Set 1 | Caso Base                       | 3     | 1                  | 0.5                     | 33%                  | 50°                    | Fragmentación gruesa para todos los bloques y relación 1 a 3 entre altura extraída y quebrada.                        |
| Set 2 | Flujo Granular                  | NO    | 1                  | 0.5                     | 33%                  | 50°                    | Fragmentación gruesa para todos los bloques y sin restricción de cave back.   |
| Set 3 | Fragmentación Fina              | 3     | 0.01               | 0.005                   | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para todos los bloques y relación 1 a 3 entre altura extraída y quebrada.                          |
| Set 4 | Fragmentación Fina (FG)         | NO    | 0.01               | 0.005                   | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para todos los bloques y sin restricción de cave back.   |
| Set 5 | Fragmentación diferenciada      | 3     | 1 - 0.01           | 0.5 - 0.005             | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para roca secundaria y gruesa para roca primaria, relación 1 a 3 entre altura extraída y quebrada. |
| Set 6 | Fragmentación diferenciada (FG) | NO    | 1 - 0.01           | 0.5 - 0.005             | 33%                  | 50°                    | Fragmentación fina para roca secundaria y gruesa para roca primaria, sin cave back.                                   |

Los resultados para la comparación de las simulaciones del Panel III tanto a nivel de plan de producción como de puntos de extracción se presentan en el Anexo B, Sección B.3. Es posible apreciar que la simulación de fragmentación diferenciada posee el menor error relativo medio mensual, que corresponde al 9% en términos de leyes de cobre y al 4% en términos de tonelaje. Además, las simulaciones que mejor reproducen la entrada de dilución, tanto para riolita como para el quebrado, son aquellas con fragmentación diferenciada.

La Tabla 37 resume la comparación de la entrada de dilución en las simulaciones con los datos mina en función de los comportamientos observados en la mina (Tabla 25). Es posible observar que, al igual que para los sectores de El Salvador, las simulaciones sólo son capaces de replicar la entrada vertical de la dilución con las condiciones de flujo impuestas en los parámetros de entrada. Mientras que la entrada lateral de la dilución sólo es reproducida de manera limitada por la simulación con fragmentación diferenciada y propagación de cave back incluida.

TABLA 37: RESUMEN DE COMPARACIONES DE ENTRADA DE DILUCIÓN A ESCALA DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN EN SIMULACIONES DE CLUSTERES DE DILUCIÓN PANEL III

| MINA              |            | Entrada de Riolita   | Entrada de quebrado                                       |
|-------------------|------------|--|---|
| Cluster Parrillas | Área Norte | Entrada <b>vertical</b> desde chimenea riolítica                           | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente       |
|                   | Área Sur   | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente (mezclado en quebrado) | Desplazamiento <b>lateral</b> desde panel adyacente       |
| Cluster LHD       | Área Norte | Entrada <b>vertical</b> desde chimenea riolítica                           | (No hay entrada declarada)                                |
|                   | Área Sur   | Entrada <b>vertical</b> desde material quebrado (mezclado en quebrado)     | Entrada <b>vertical</b> desde quebrado de sector anterior |
| SIMULACIONES      |            | Entrada de Riolita   | Entrada de quebrado                                       |
| Cluster Parrillas | Área Norte | ✓ vertical   | ✓ lateral limitada  |
|                   | Área Sur   | ✓ lateral limitada   | ✓ lateral limitada  |
| Cluster LHD       | Área Norte | x  | (No hay entrada declarada)                                |
|                   | Área Sur   | ✓ vertical   | ✓ vertical  |

La Figura 105 muestra vistas en planta con los PEQ(3%) de los clusteres de dilución correspondientes 2 simulaciones comparativas con los parámetros del Set 5 (fragmentación diferenciada con relación de metros extraídos y metros quebrados de 1 a 3). La Figura 105a corresponde a la extracción simulada tanto de los clusteres de dilución como del resto del Panel III, es decir, es una de las simulaciones que ha sido analizada durante esta sección. En este caso, la extracción previa de los paneles adyacentes al Cluster Parrillas hace que el material quebrado baje hasta ubicarse al

costado de éste, dejando la fuente de dilución al costado oeste. La Figura 105b corresponde a la extracción simulada sólo de los clusteres de dilución. En este caso, el quebrado no se desplaza de su posición anterior a la explotación del Panel III, por lo tanto, se ubica encima de los paneles adyacentes antes de comenzar la extracción del cluster. Así, se imposibilita el ingreso de manera lateral. Es posible observar en la figura que cuando se genera la posibilidad de dilución lateral con la condición de propagación del cave back de manera vertical (a través de la razón de 3 metros quebrados por 1 metro extraído), la herramienta de simulación sólo reproduce un desplazamiento lateral limitado.

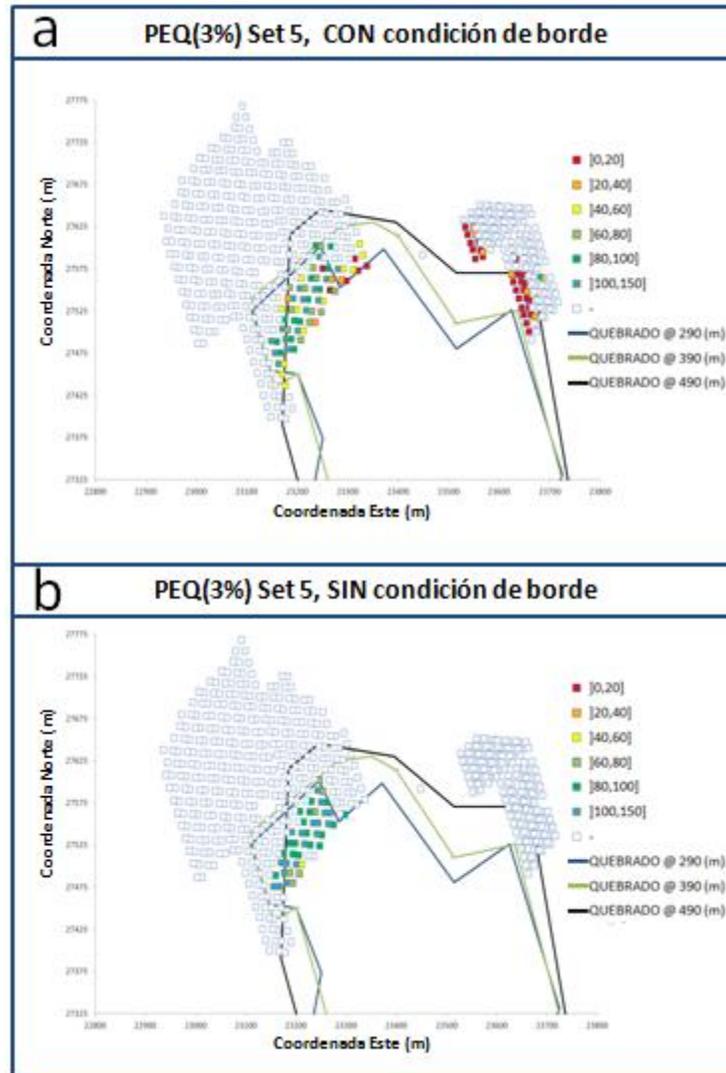


FIGURA 105: VISTAS EN PLANTA DE PEQ(3%) DE SIMULACIONES COMPARATIVAS PARA CLUSTERES DE DILUCIÓN PANEL III, DONE SE MUESTRA: A) SIMULACIÓN DE CLUSTERES INCLUYENDO PANEL III COMPLETO PARA SET 5, Y B) SIMULACIÓN DE CLUSTERES AISLADOS PARA SET 5

### 6.3.4 Resumen de resultados de comparación con sectores de base de datos

La Tabla 38 muestra, a escala de planes de producción, los parámetros que poseen los menores errores de reproducción junto con los errores asociados en términos de tonelajes, leyes y entrada de dilución para los sectores de El Teniente, El Salvador y Andina. Es posible apreciar que en términos de leyes, el error relativo medio mensual se encuentra entre un 7% y un 21%, mientras que en términos de tonelaje entre un 0.1% y un 6%. Con respecto a la entrada de dilución es posible apreciar que para El Salvador, la entrada de dilución en los sectores difiere entre -6 a 1 meses con los datos mina. Para los clusteres de dilución de Andina, la diferencia en la entrada de dilución con respecto a los datos mina va entre -3 a 6 meses.

TABLA 38: PARÁMETROS AJUSTADOS DE REBOP A OPERACIONES DE CODELCO Y ERRORES DE ESTIMACIÓN ASOCIADOS

| División    | Sector                       | Parámetros de simulación |                                 |                          |                                  |                            | Errores de REBOP                |                |   |    |
|-------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------|---|----|
|             |                              | k2<br>(m/m)              | Ángulo<br>de<br>fricción<br>(°) | Diámetro<br>medio<br>(m) | Desv.<br>Est.<br>diámetro<br>(m) | Porosidad<br>máxima<br>(%) | Error relativo<br>medio mensual |                | Diferencia<br>en meses                            |    |
|             |                              |                          |                                 |                          |                                  |                            | Tonelajes<br>extraídos          | Leyes<br>de Cu | Dilución<br>(entrada de<br>marcador<br>geológico) |    |
| El Teniente | Diablo<br>Regimiento<br>(DR) | 3                        | 50                              | 1                        | 0.5                              | 34                         | 4%                              | 7%             | -   |    |
|             | Esmeralda (ES)               | 3.1                      | 50                              | 1                        | 0.5                              | 34                         | 6%                              | 7%             | -   |    |
|             | Reservas Norte<br>(RENO)     | 3.4                      | 50                              | 1                        | 0.5                              | 34                         | 2%                              | 16%            | -   |    |
| El Salvador | Inca Norte (IN)              | NO                       | 50                              | 1                        | 0.5                              | 33                         | 6%                              | 12%            | -6  |    |
|             | Inca Central<br>Este (ICE)   | NO                       | 50                              | 1                        | 0.5                              | 33                         | 0.30%                           | 21%            | -2  |    |
|             | Inca Central<br>Oeste (ICW)  | NO                       | 50                              | 1                        | 0.5                              | 33                         | 5%                              | 13%            | 1   |    |
|             | Inca Oeste (IW)              | NO                       | 50                              | 1                        | 0.5                              | 33                         | 0.10%                           | 9%             | -   |    |
| Andina      | Panel<br>III                 | LHD                      | 3                               | 50                       | 1                                | 0.5                        | 33                              | 4%             | 9%  | 6  |
|             |                              | Parrillas                |                                 |                          | 0.01                             | 0.005                      |                                 |                |   | -3 |

## 6.4 CONCLUSIONES DE COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS

La Tabla 39 muestra las conclusiones derivadas del estudio de comparación de REBOP con datos de las operaciones de CODELCO-Chile analizadas. De ellas se desprende que las simulaciones con los parámetros de entrada analizados realizan una buena reproducción de la entrada de dilución a nivel de puntos de extracción cuando el mecanismo predominante corresponde al desplazamiento vertical de la dilución, sin embargo, si se deseara probar el desplazamiento lateral completo del material diluyente (y no una parte limitada como ocurre con estos parámetros) se debe incluir el perfil de cave back con propagación preferente hacia la fuente de material diluyente.

TABLA 39: CONCLUSIONES DERIVADAS DE LA COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE OPERACIONES DE CODELCO-CHILE

|  |                                | Parámetro  | Errores de REBOP  | Conclusiones   |
|--|--------------------------------|--|---|--|
| Comparación con operaciones de CODELCO-Chile | Escala de Plan de Producción   | <b>Tonelaje extraído</b>   | En términos del error relativo medio mensual, los tonelajes simulados difieren de los datos mina entre un 2% a 6%.  | La precisión de las simulaciones en términos de la extracción del tonelaje asignado es inversamente proporcional al tiempo de simulación. Debido a la discretización utilizada. Para simulaciones de gran escala (2000 puntos que extraen 2 (Mt)) es posible obtener una precisión del 4% del error relativo medio simulando un tiempo mayor a 6 días. |
|  |                                | <b>Ley de cobre</b>  | En términos del error relativo medio mensual, las leyes de cobre simuladas difieren de los datos mina entre un 7% a 21%.  | A escala de macro secuencia, REBOP reproduce la entrada de dilución con 6 meses de diferencia y tiene una cota superior del error relativo mensual del 21% para las leyes, lo que implica que la herramienta es capaz de reproducir el flujo gravitacional a escala de macro secuencia para el largo plazo.  |
|  | <b>Dilución</b>                | Para El Salvador, la entrada de dilución en los sectores difiere entre -6 a 1 meses con los datos mina. Para los clusteres de dilución de Andina, la diferencia en la entrada de dilución con respecto a los datos mina va entre -3 a 6 meses. |   |  |
|  | Escala de Puntos de Extracción | <b>Comportamiento de la entrada de dilución</b>  | En términos generales, y con las condiciones de flujo estudiadas, REBOP es capaz de reproducir de manera cualitativa y cuantitativa la entrada de dilución vertical a los puntos de extracción. Mientras que sólo realiza la reproducción de la entrada lateral de la dilución de manera acotada para el perfil de propagación de cave back vertical analizado. |  |

# CAPÍTULO 7

---

## PRUEBA DE HIPÓTESIS DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN LATERAL

El presente capítulo contiene un análisis de factibilidad de la principal hipótesis presentada en el Capítulo 5, que corresponde al mecanismo de entrada de dilución lateral. Este análisis se realiza en dos dimensiones, la primera consiste en analizar la factibilidad mecánica del proceso de desprendimiento del material diluyente desde la fuente y la posibilidad de su desplazamiento lateral sobre la pila de mineral en estado granular. La segunda consiste en probar la factibilidad del mecanismo desde el punto de vista de la teoría de flujo gravitacional, a través de la simulación en REBOP de las condiciones que permitirían al material desplazarse de manera lateral. De esta manera, se prueba la hipótesis de mecanismo de entrada de dilución lateral a través de:

- Análisis de equilibrio límite de air gap y movimiento lateral sobre la pila:  
Corresponde al cálculo del air gap mínimo necesario para permitir la desestabilización de una cuña de material quebrado en función de los parámetros geomecánicos del material quebrado y las condiciones de profundidad de la operación. De esta forma, se pretende parametrizar el problema simplificado de la cuña de material quebrado para analizar su estabilidad y concluir acerca de la factibilidad mecánica del mecanismo propuesto. Además, se busca probar que el desplazamiento lateral del material diluyente una vez que éste ingresa en la pila es factible desde el punto de vista mecánico.
- Simulación en REBOP con propagación de cave back diferenciada:  
Consiste en simular un sector representativo del mecanismo de entrada de dilución lateral incluyendo un perfil de propagación preferente del cave back hacia el material quebrado ubicado en un costado. De esta manera, se pretende comparar estos resultados con la simulación del mismo sector con una propagación homogénea y vertical del cave back (presentada en el Capítulo 6), y concluir primero acerca de la factibilidad del mecanismo desde el punto de vista de la teoría de flujo gravitacional (en base a cuyos fundamentos está construida la herramienta de simulación).

### 7.1 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE DE AIR GAP Y DESPLAZAMIENTO SOBRE LA PILA

Como se señala anteriormente, el análisis de equilibrio límite de air gap consiste en parametrizar el problema simplificado del equilibrio de una eventual cuña de material quebrado formada a partir del air gap generado por el desajuste periódico entre la propagación del cave back y la extracción de la pila de mineral en estado granular. La

Figura 106 ilustra la formación de la cuña parametrizada en un perfil conceptual del problema, el análisis se realiza sobre la superficie lineal de ancho unitario.

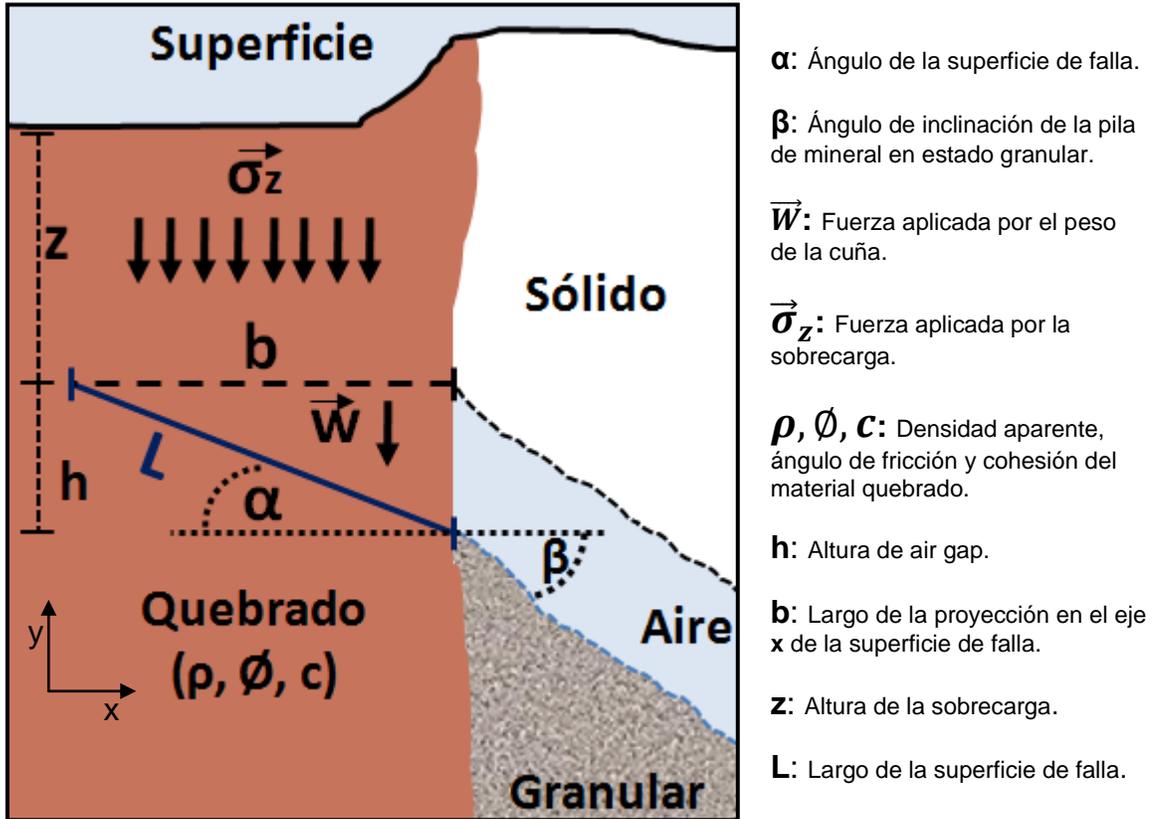


FIGURA 106: PERFIL CONCEPTUAL DE ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE DE AIR GAP SOBRE SUPERFICIE LINEAL DE FALLA DE ANCHO UNITARIO

La condición de equilibrio del material sobre la superficie de falla puede medirse a través del factor de seguridad ( $FS$ ), el cual se define en función de la suma de fuerzas estabilizadoras sobre la superficie ( $F_E$ ) y la suma de fuerzas desestabilizadoras sobre la superficie ( $F_D$ ) de la siguiente manera:

$$FS = \frac{F_E}{F_D}$$

ECUACIÓN 32: FACTOR DE SEGURIDAD ( $FS$ )

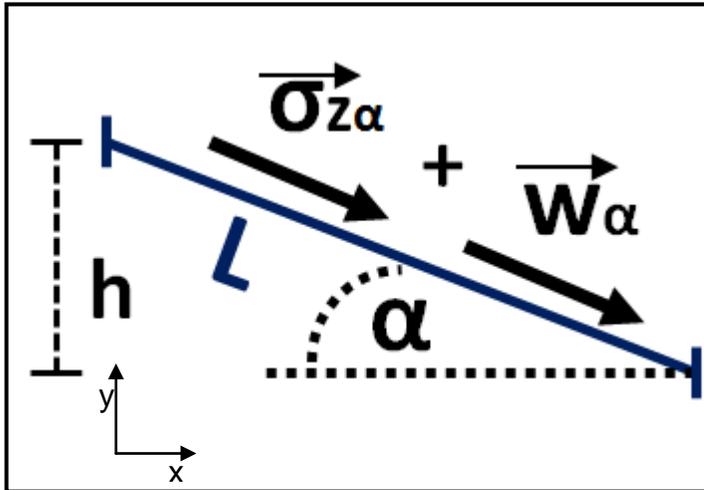
Cuando  $FS$  es igual a 1, las fuerzas estabilizadoras se igualan a las desestabilizadoras y el material sobre la superficie de falla se encuentra en equilibrio estático. Por lo tanto, si  $FS$  es mayor o igual a 1, no habrá desplazamiento del material quebrado hacia la pila de mineral en estado granular. Mientras que si  $FS$  es menor a 1, el material quebrado se deslizará sobre la superficie de falla desplazándose por encima de la pila de material granular.

De manera de encontrar la altura de air gap ( $h$ ) mínima para desequilibrar el material sobre la cuña, se debe encontrar una expresión del factor de seguridad ( $FS$ ) en función

de los parámetros definidos en la Figura 106. Es decir, se debe encontrar una expresión para  $F_E$  y  $F_D$  en función de estos parámetros.

### 7.1.1 Suma de fuerzas desestabilizadoras $F_D$

La Figura 107 muestra las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre la superficie lineal de falla.



$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla.

$\vec{W}_\alpha$ : Componente de la fuerza aplicada por el peso de la cuña sobre la superficie lineal de falla.

$\vec{\sigma}_{z\alpha}$ : Componente de la fuerza aplicada por la sobrecarga a la superficie lineal de falla.

$h$ : Altura de air gap.

$L$ : Largo de la superficie de falla.

FIGURA 107: DIAGRAMA DE FUERZAS DESESTABILIZADORAS SOBRE LA SUPERFICIE LINEAL DE FALLA

Se tiene que:

$$\vec{W}_\alpha = \rho \cdot g \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \cos(\alpha)$$

ECUACIÓN 33: COMPONENTE DE LA FUERZA APLICADA POR EL PESO DE LA CUÑA SOBRE LA SUPERFICIE LINEAL DE FALLA EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP Y ÁNGULO DE FALLA

Donde  $g$  es la aceleración de gravedad. Además, considerando la aproximación de Janssen (1985):

$$\vec{\sigma}_{z\alpha} = \rho \cdot g \cdot \frac{h}{K_T} \cdot (1 - e^{-K_T \cdot z}) \cdot \cos(\alpha)$$

ECUACIÓN 34: COMPONENTE DE LA FUERZA APLICADA POR LA SOBRECARGA SOBRE LA SUPERFICIE LINEAL DE FALLA EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP, ALTURA DE SOBRECARGA Y ÁNGULO DE FALLA

Donde:

$$K_T = \frac{\tan(\phi) \cdot b \cdot (1 - \sin(\phi))}{(2 \cdot b + 2) \cdot (1 + \sin(\phi))}$$

ECUACIÓN 35: CONSTANTE DE JANSSEN PARA LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA

De esta forma:

$$F_D = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left( \frac{1 - e^{-K_T \cdot z}}{K_T} + \frac{h}{2} \right) \cdot \cos(\alpha)$$

ECUACIÓN 36: SUMA DE FUERZAS DESESTABILIZADORAS EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP, ÁNGULO DE FRICCIÓN, ALTURA DE SOBRECARGA Y ÁNGULO DE FALLA

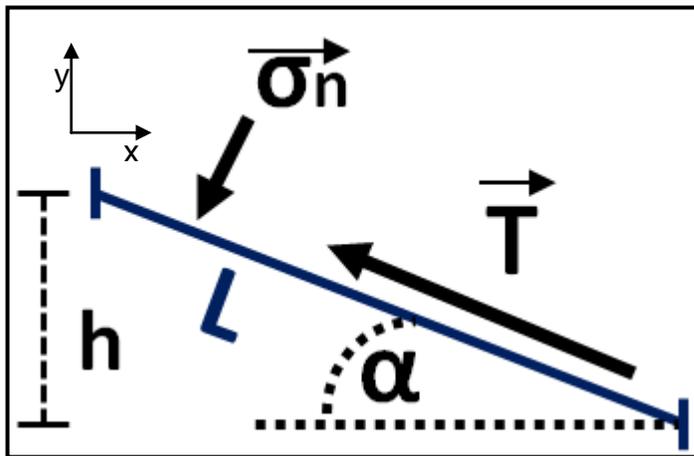
### 7.1.2 Suma de fuerzas estabilizadoras $F_E$

La fuerza que se opone al movimiento de la cuña es la resistencia al cizalle del material quebrado ( $T$ ), la cual se define según Coulomb (1776), de la siguiente manera:

$$T = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$$

ECUACIÓN 37: RESISTENCIA AL CIZALLE DE UN MATERIAL GRANULAR, COULOMB (1776)

Donde  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal aplicado sobre la superficie de falla y  $C$  es la cohesión del material quebrado. La Figura 108 muestra la fuerza estabilizadora aplicada sobre el plano lineal de falla.



$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla.

$\vec{T}$ : Fuerza de resistencia al cizalle aplicada sobre la superficie lineal de falla.

$\vec{\sigma}_n$ : Fuerza normal aplicada sobre la superficie lineal de falla.

$h$ : Altura de air gap.

$L$ : Largo de la superficie de falla.

FIGURA 108: DIAGRAMA DE FUERZAS ESTABILIZADORAS SOBRE LA SUPERFICIE LINEAL DE FALLA

Se tiene que, para este caso, la fuerza normal aplicada sobre la superficie lineal de falla es:

$$\vec{\sigma}_n = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left( \frac{1 - e^{-K_T \cdot z}}{K_T} + \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\tan(\alpha)}$$

ECUACIÓN 38: FUERZA NORMAL APLICADA SOBRE LA SUPERFICIE LINEAL DE FALLA EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP, ALTURA DE SOBRECARGA Y ÁNGULO DE FALLA

Así, la suma de fuerzas estabilizadoras (fuerza de resistencia al cizalle) en función de los parámetros del análisis es:

$$F_E = c \cdot \frac{h}{\operatorname{sen}(\alpha)} + \rho \cdot g \cdot h \cdot \left( \frac{1 - e^{-K_T \cdot z}}{K_T} + \frac{h}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{\tan(\phi)}{\tan(\alpha)}$$

ECUACIÓN 39: SUMA DE FUERZAS DESESTABILIZADORAS EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP, ALTURA DE SOBRECARGA, ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL MATERIAL QUEBRADO, COHESIÓN DEL MATERIAL QUEBRADO Y ÁNGULO DE FALLA

### 7.1.3 Factor de seguridad $FS$

De acuerdo a lo anterior, el factor de seguridad para la superficie de falla en función de los parámetros y la altura de air gap es:

$$FS = \frac{c}{\rho \cdot g \cdot \left( \frac{1 - e^{-K_T \cdot z}}{K_T} + \frac{h}{2} \right) \cdot \operatorname{sen}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} + \frac{\tan(\phi)}{\tan(\alpha)}$$

ECUACIÓN 40: FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE DENSIDAD DE QUEBRADO, ALTURA DE AIR GAP, ALTURA DE SOBRECARGA, ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL MATERIAL QUEBRADO, COHESIÓN DEL MATERIAL QUEBRADO Y ÁNGULO DE FALLA

La Tabla 40 muestra los valores de la caracterización geotécnica del material quebrado proveniente del Panel II de Andina.

TABLA 40: VALORES DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MATERIAL QUEBRADO PROVENIENTE DEL PANEL II DE ANDINA

| Parámetro                   | Unidad            | Valor |
|-----------------------------|-------------------|-------|
| Densidad                    | kg/m <sup>3</sup> | 1600  |
| Cohesión (C)                | MPa               | 0.01  |
| Fricción ( $\phi$ )         | °                 | 32    |
| Gravedad                    | m/s <sup>2</sup>  | 9.8   |
| Diámetro medio ( $d_{50}$ ) | m                 | 0.2   |

Utilizando los valores de la Tabla 40, se construyen curvas de  $FS$  en función del ángulo de falla para distintas alturas de air gap bajo diferentes condiciones de altura de sobrecarga. La Figura 109a muestra los resultados para una altura de sobrecarga de 5 (m), la Figura 109b para 10 (m), Figura 109c para 50 (m) y la Figura 109d para 100 (m). Es posible apreciar que a partir de una altura de sobrecarga de 10 (m), la formación de un plano de falla sobre 35° garantiza que el material quebrado se desestabilizará y se desplazará sobre la pila de mineral en estado granular para cualquier altura de air gap. De esta manera, para que el material quebrado se desestabilice y pueda comenzar su movimiento sobre la pila basta con que el desfase entre la altura de la pila de material granular y el cave back, en un momento puntual de la extracción, sea igual al diámetro de la partícula de material quebrado.

La condición anteriormente descrita es suficiente para que se desprenda un grupo de partículas de material diluyente. Sin embargo, para que ocurra un ingreso significativo de

dilución a la pila de material granular, el espacio del air gap debe ser suficiente para que las partículas de material diluyente logren vencer el efecto arco generado por la apertura. Hoek (2004) plantea que para vencer el efecto arco, la apertura a través de la cual puede moverse un grupo de partículas debe ser superior a tres veces el diámetro medio de éstas. De esta forma, si se genera un espacio de aire igual o superior a tres veces el diámetro medio de las partículas, éstas podrán fluir libremente hasta la pila de material granular. De la caracterización geomecánica del material quebrado proveniente del Panel II de Andina se infiere que para que el material quebrado fluya venciendo el efecto arco, es necesaria un desfase entre el cave back y la pila de material granular de 0.6 metros.

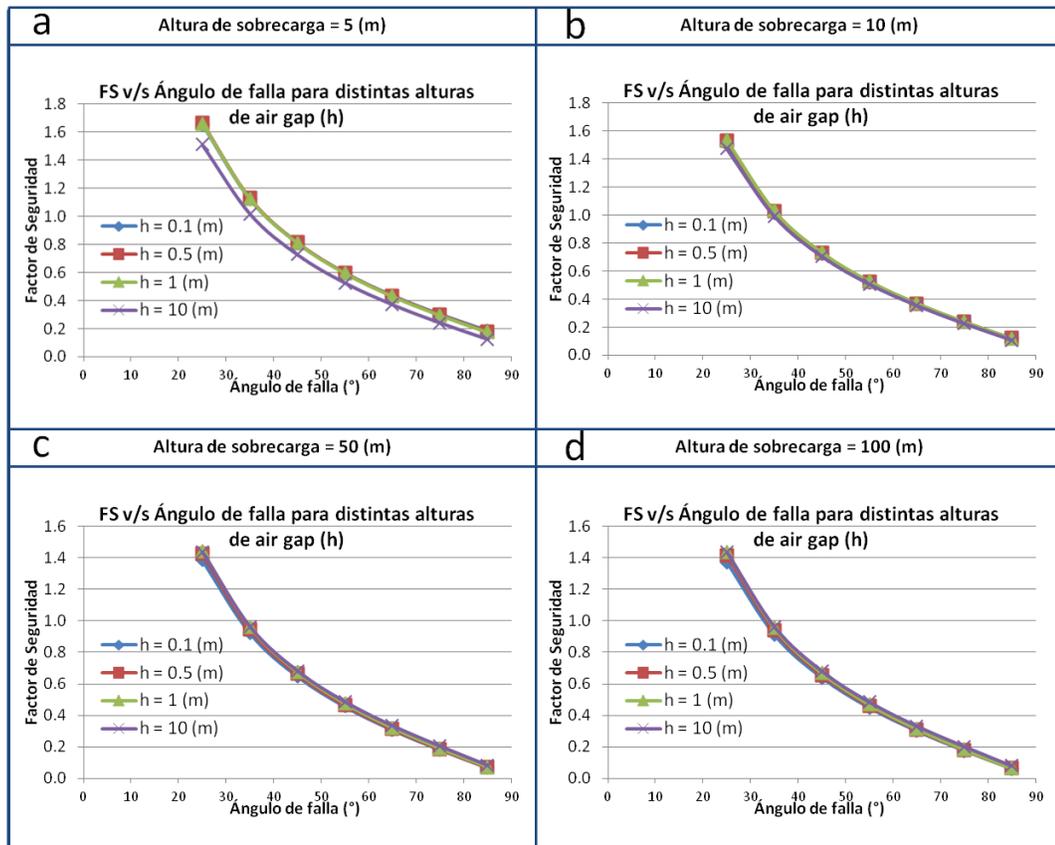


FIGURA 109: FACTOR DE SEGURIDAD COMO FUNCIÓN DE ÁNGULO DE FALLA PARA DISTINTAS ALTURAS DE AIR GAP CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA, CON ALTURA DE SOBRECARGA: A) DE 5 (M), B) DE 10(M), C) DE 50 (M), Y D) DE 100 (M)

#### 7.1.4 Desplazamiento lateral sobre la pila

Habiéndose desprendido el material quebrado de la fuente de dilución lateral, si el ángulo de inclinación de la pila de mineral en estado granular ( $\beta$ ) es mayor que el ángulo de fricción del material quebrado ( $\phi$ ), entonces éste se desplazará de manera lateral descendiendo por la pila hasta llegar a puntos de extracción alejados de la fuente de dilución lateral. El ángulo de inclinación local de la pila en estado granular entre dos puntos de extracción dependerá de las velocidades de extracción y la diferencia entre el tiempo de inicio en la extracción de uno y otro punto, tal como se indica en el Capítulo 5. De esta forma, durante la extracción de un panel,  $\beta$  puede tomar diferentes valores,

variando de manera puntual según el perfil de extracción y alcanzando ángulos superiores a los de fricción del material diluyente.

Si se considera el caso del largo plazo, donde se supone que la pila de material granular se encuentra en su ángulo de reposo natural, la migración lateral de material diluyente será posible si el ángulo de fricción del material de la pila granular ( $\phi_p$ ) es mayor que el del material diluyente ( $\phi$ ). La Tabla 41 muestra los valores de los ángulos de fricción de la caracterización geotécnica de Andina para los distintos materiales observados en la explotación. Es posible observar de la tabla que los ángulos de fricción de los materiales que componen la pila de material granular en el Panel III (Primario y Secundario) son mayores que el ángulo de fricción del material quebrado. Por lo tanto, de acuerdo a los datos de la operación y lo anteriormente expuesto, la migración lateral del material diluyente por encima de la pila sería posible para las condiciones de esta operación.

TABLA 41: ÁNGULOS DE FRICCIÓN MATERIALES PANEL II Y PANEL III ANDINA

| Material   | Ángulo de Fricción (°) |
|------------|------------------------|
| Primario   | 58                     |
| Secundario | 53                     |
| Quebrado   | 32                     |

## 7.2 SIMULACIÓN EN REBOP CON PROPAGACIÓN DE CAVE BACK DIFERENCIADA

De manera de probar la hipótesis de mecanismo de entrada de dilución lateral desde el punto de vista de su coherencia con la teoría de flujo gravitacional, se realizan simulaciones en REBOP de un sector representativo de este mecanismo incluyendo un perfil de propagación de cave back hacia la fuente de dilución lateral. Para esto, se elige el Cluster Parrillas de Andina. Según el análisis de entrada de dilución presentado en el Capítulo 5, este sector presenta clara evidencia de desplazamiento lateral del material quebrado desde el panel contiguo explotado dos años antes del comienzo de su extracción.

Se realizan tres simulaciones con los parámetros de fragmentación y flujo del set 5 de Andina, pero con perfiles de propagación de cave back hacia la fuente de dilución lateral. La primera (simulación 1) consiste en un perfil diferenciado de razón de propagación de cave back (relación de metros quebrados por metro extraído) según la distancia de las bateas a la fuente de dilución lateral (ver Figura 110). La Figura 112 muestra una sección vertical del perfil de propagación de cave back por período para la simulación 1 del Cluster Parrillas. La segunda simulación (simulación 2) utiliza este mismo perfil de propagación, sin embargo, agrega una restricción de colgadura a una altura establecida por el modelo geotécnico de RMR para el sector parrillas. A modo de sensibilizar el análisis con respecto a una superficie de cuelgue, a partir de un valor de RMR de 55, los bloques no se hunden en la simulación, obteniéndose así un perfil de propagación creciente hasta una cavidad sobre la cual no hay propagación del cave back. La razón por la cual se escoge el RMR de 55 es porque el perfil de calidad de macizo rocoso en el sector parrillas sugiere un salto en la calidad del macizo rocoso a partir de cierta altura, el cual queda representado por este valor de RMR (Figura 113a). La Figura 113b ilustra una sección vertical del perfil de propagación del cave back de la simulación 2. La

tercera simulación (simulación 3) representa una sensibilidad de la segunda con respecto a la velocidad de propagación diferenciada. La Figura 111 muestra el perfil de propagación asignado para la simulación 3. La Figura 112c ilustra una sección vertical del perfil de propagación de cave back para la simulación 3.

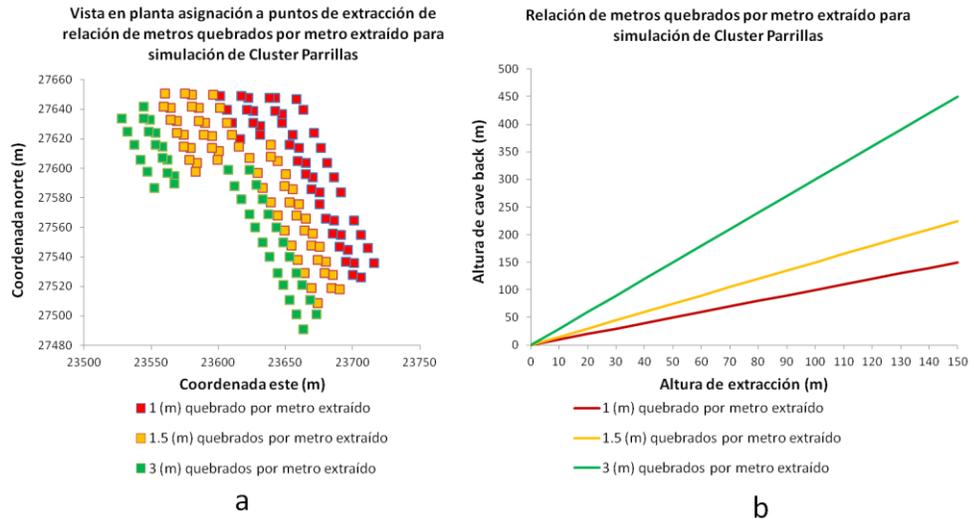


FIGURA 110: A) VISTA EN PLANTA DE ASIGNACIÓN A PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE RELACIÓN DE METROS QUEBRADOS POR METRO EXTRAÍDO PARA SIMULACIÓN 1 DE CLUSTER PARRILLAS, B) RELACIÓN DE METROS QUEBRADO POR METRO EXTRAÍDO PARA SIMULACIÓN 1 DE CLUSTER PARRILLAS

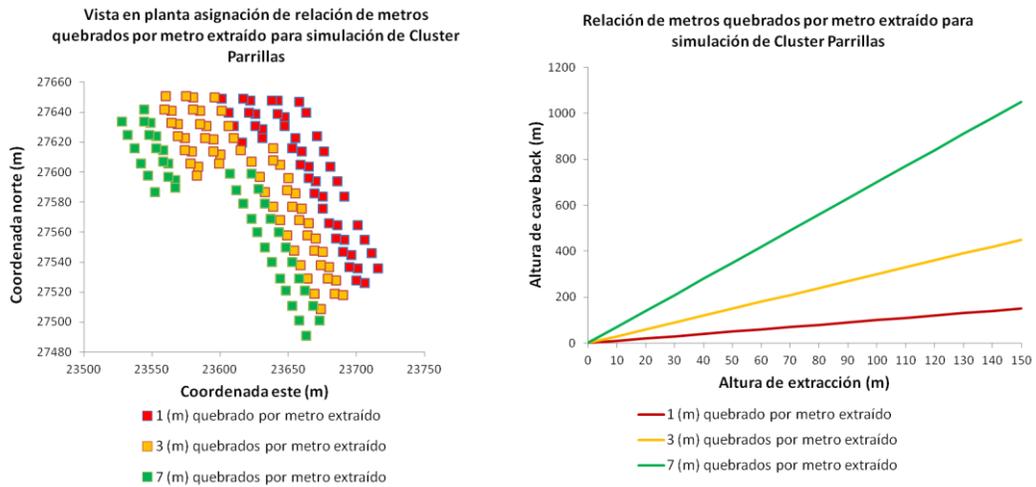


FIGURA 111: A) VISTA EN PLANTA DE ASIGNACIÓN A PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE RELACIÓN DE METROS QUEBRADOS POR METRO EXTRAÍDO PARA SIMULACIÓN 3 DE CLUSTER PARRILLA, B) RELACIÓN DE METROS QUEBRADOS POR METRO EXTRAÍDO PARA SIMULACIÓN 3 DE CLUSTER PARRILLAS

La Figura 114 muestra las vistas en planta con los resultados del PEQ(3%) de las simulaciones con propagación de cave back diferenciadas (simulación 1, simulación 2 y simulación 3) junto con los datos mina y la simulación del set 5 (con propagación uniforme del cave back). Es posible observar que la simulación 1 no difiere mucho del set 5, sin embargo, las simulaciones 2 y 3 muestran desplazamiento del material quebrado hasta algunas de las bateas ubicadas más al este del panel. La Tabla 42

muestra la confiabilidad y el PEQ(3%) para las simulaciones y datos mina. Es posible apreciar que la confiabilidad de las 4 simulaciones no difiere mucho, sin embargo, la simulación 2 presenta un PEQ(3%) mucho más similar al de los datos mina en términos de media y desviación estándar. De esta manera, es posible afirmar que, a pesar de no representar una reproducción precisa de la realidad, las simulaciones 2 y 3 muestran la reproducción del mecanismo de dilución lateral para algunos puntos de extracción.

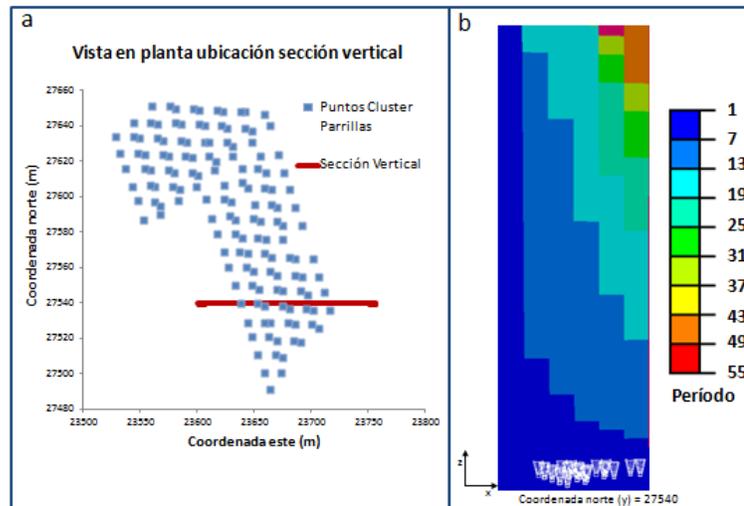


FIGURA 112: ILUSTRACIÓN DE PROPAGACIÓN DE CAVE BACK EN EL TIEMPO PARA SIMULACIÓN 1 DE CLUSTER PARRILLAS, DONDE SE MUESTRA: A) VISTA EN PLANTA DE LA UBICACIÓN DE LA SECCIÓN VERTICAL, B) SECCIÓN VERTICAL DE PROPAGACIÓN DE CAVE BACK POR PERÍODO

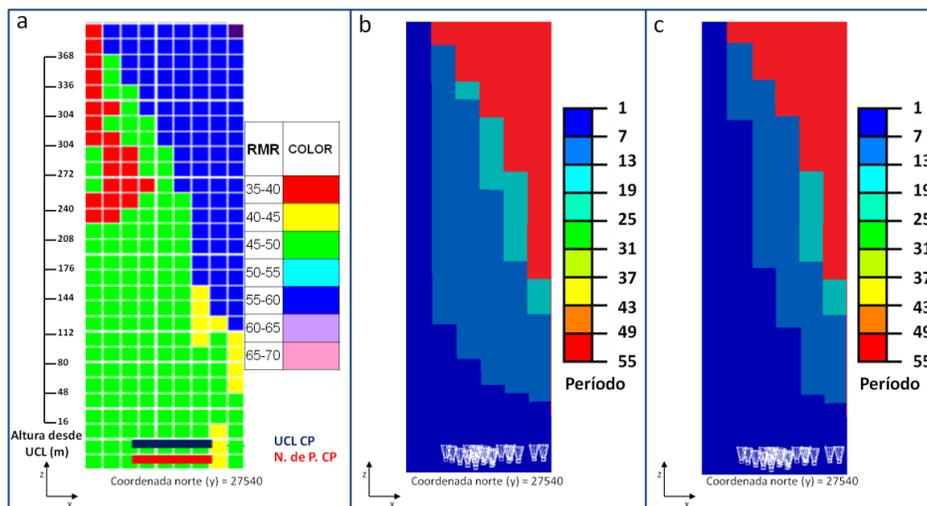


FIGURA 113: SECCIÓN VERTICAL DE CLUSTER PARRILLAS DONDE SE MUESTRA: A) RMR DE BLOQUES EN EL CLUSTER PARRILLAS, B) PROPAGACIÓN DE CAVE BACK POR PERÍODO PARA SIMULACIÓN 2 DE CLUSTER PARRILLAS, Y C) PROPAGACIÓN DE CAVE BACK POR PERÍODO PARA SIMULACIÓN 3 DE CLUSTER PARRILLAS

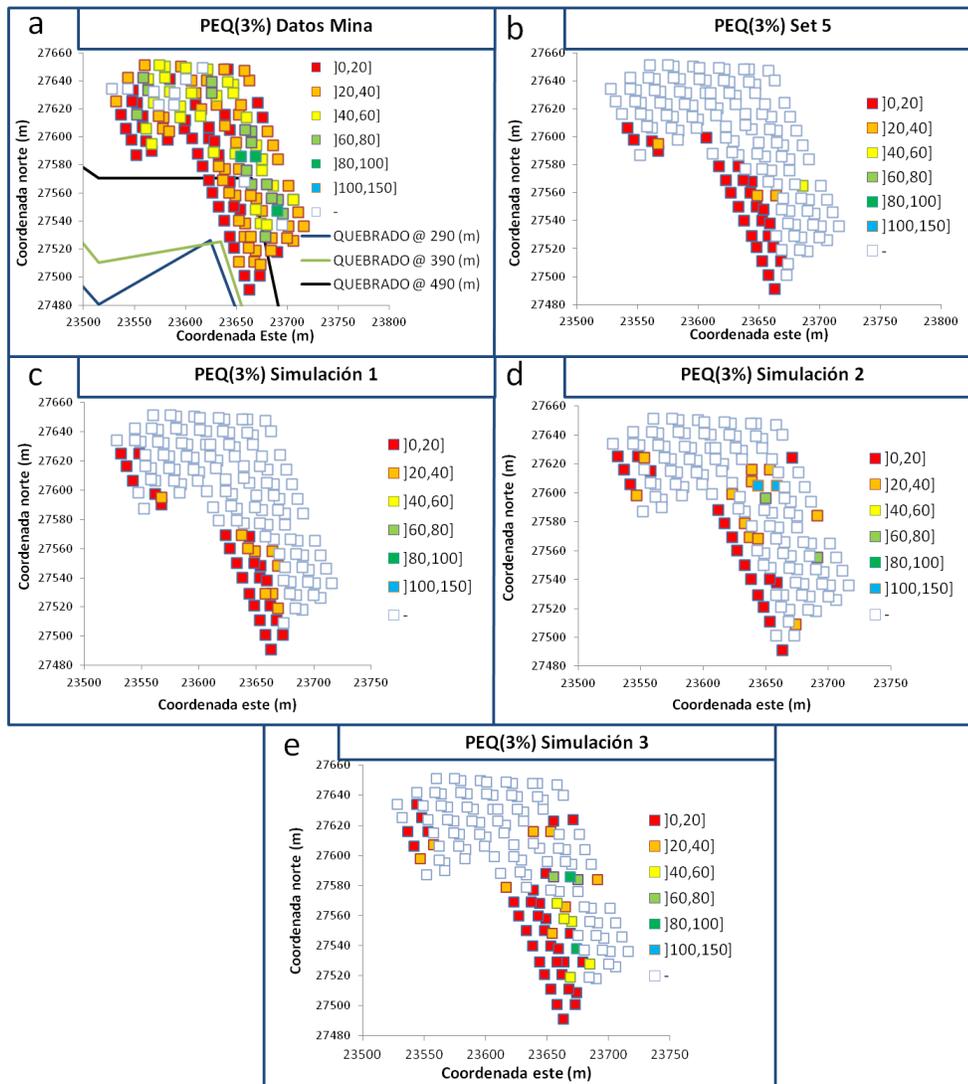


FIGURA 114: VISTAS EN PLANTA DE PEQ(3%) CLUSTER PARRILLAS, DONDE SE MUESTRAN: A) DATOS MINA, B) SET 5 PROPAGACIÓN VERTICAL UNIFORME DE CB, C) SIMULACIÓN 1 CON PROPAGACIÓN DIFERENCIADA DE CB, Y D) SIMULACIÓN 2 CON PROPAGACIÓN DIFERENCIADA Y COLGADURA DE CB

TABLA 42: CONFIABILIDAD Y PEQ(3%) MEDIO PARA DATOS MINAS, SET 5, SIMULACIÓN 1 Y SIMULACIÓN 2

|            |                              | Confiabilidad (%) |    | Media     |
|------------|------------------------------|-------------------|----|-----------|
| Zona Norte | PEQ(3%) Datos Mina 33 ± [21] | Set 5             | 57 | 13 ± [6]  |
|            |                              | Simulación 1      | 57 | 13 ± [10] |
|            |                              | Simulación 2      | 62 | 30 ± [34] |
|            |                              | Simulación 3      | 64 | 23 ± [25] |
| Zona Sur   | PEQ(3%) Datos Mina 32 ± [19] | Set 5             | 70 | 13 ± [11] |
|            |                              | Simulación 1      | 73 | 14 ± [12] |
|            |                              | Simulación 2      | 62 | 18 ± [23] |
|            |                              | Simulación 3      | 79 | 18 ± [21] |

### 7.3 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desde el punto de vista mecánico, el análisis de equilibrio límite de air gap llevado a cabo en el presente capítulo indica que el proceso físico fundamental del mecanismo de entrada de dilución lateral -que corresponde al desprendimiento del material desde la fuente lateral debido al espacio inducido por el desfase entre la extracción y la propagación del cave back- es factible para un espacio de aire (air gap) mayor a 3 veces el diámetro medio de las partículas de material quebrado, lo que asegura el rompimiento de un eventual arco mecánico generado luego del desplazamiento de las primeras partículas hacia la pila. Además, una vez que el material ingresa a la pila, su desplazamiento lateral por sobre ésta es posible debido a que el ángulo de inclinación de la pila puede tomar valores superiores al ángulo de fricción del material diluyente. Así, es posible concluir que el mecanismo de entrada de dilución lateral es factible desde el punto de vista mecánico para las condiciones de una explotación de panel caving.

Por otra parte, la inclusión de un perfil de propagación hacia la fuente de dilución del cave back junto con una colgadura del mismo en la herramienta de simulación de flujo gravitacional posee implicancias en el desplazamiento lateral de la dilución. Los resultados muestran que al simular la condición de colgadura del cave back después de cierta altura de propagación, se reproduce la entrada de dilución en algunos de los puntos más alejados de la fuente, lo que implica un desplazamiento lateral sobre 130 (m). Por lo tanto, a pesar de que desde el punto de vista estadístico la cantidad de datos en que se reproduce este comportamiento no permite concluir que el simulador reproduzca el fenómeno en su totalidad, es posible aseverar que la inclusión de las condiciones hipotéticas de movimiento lateral inducen desplazamientos laterales en los marcadores mucho mayores que los observados con propagación uniforme del cave back. Finalmente, mientras no se incorporen al modelo las ecuaciones de desprendimiento y escurrimiento por sobre la pila del material quebrado, éste no podrá efectuar la reproducción completa del flujo lateral de la dilución.

# CAPÍTULO 8

---

## CONCLUSIONES Y ENFOQUE FUTURO

### 8.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS

A pesar de que la dilución es una variable fundamental en una operación minera de hundimiento y su entrada temprana tiene implicancias relevantes en el resultado global del negocio, en gran parte de las operaciones de hundimiento se utilizan índices de uniformidad en términos de tonelaje para retrasar su entrada a través del control de tiraje. Esta práctica se realiza independientemente de las condiciones iniciales referentes a la ubicación que posea la fuente de dilución con respecto al panel en explotación.

El análisis de la entrada de dilución en los puntos de extracción de seis sectores productivos de las operaciones mineras de hundimiento de CODELCO-Chile -basado en las curvas de dilución de los puntos de extracción, las alturas de columna in-situ, la uniformidad con la cual se extraen y la secuencia de extracción- permite concluir lo siguiente:

- Una fracción importante de las curvas de dilución observada en función del porcentaje de extracción de columna in-situ en los puntos de extracción poseen un comportamiento en forma de pulso. Esto quiere decir que, a lo largo de la vida del punto de extracción, la dilución no se comporta como una función creciente a partir de la primera vez que se observa.
- El análisis de los datos de mina permite identificar tres mecanismos de entrada de la dilución. Dos de ellos ya son conocidos, y corresponden a la entrada vertical desde un sector ubicado encima del panel analizado y a la entrada de dilución acompañada de un estallido de aire debido a la propagación repentina del caving luego de una colgadura. El tercero corresponde a un mecanismo identificado como resultado de este trabajo. Éste ocurre cuando el panel se ubica al costado de un sector ya explotado y el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire que permita el ingreso de diluyente y el ángulo de la pila granular permite el flujo lateral del primero, éste viajará hasta puntos de extracción alejados de la interfaz con el material quebrado induciendo en éstos una entrada temprana de la dilución.
- Cuando un panel se encuentra debajo de un sector previamente explotado, el control de la propagación vertical del cave back junto con la uniformidad de la extracción en términos de tonelajes permitirán que la entrada de la dilución a nivel de puntos de extracción sea en general tardía.

- Cuando un panel se encuentra al costado de un sector previamente explotado y no se efectúa una estrategia de extracción que evite que el cave back se propague hacia la fuente de dilución, la propagación de éste hacia el material quebrado por el sector previamente explotado inducirá un movimiento lateral de la dilución que contaminará a puntos de extracción alejados de la fuente. De esta manera, se tendrá en el panel una entrada de la dilución temprana tanto para los puntos contiguos al sector previamente explotado como para los lejanos si se considera una extracción uniforme.
- La forma y la dirección en que se propaga el cave back juegan un rol fundamental en el comportamiento de la entrada de la dilución por cuanto definen el material disponible para extraer e inciden en la forma con la que la dilución entra a la pila de material granular.
- De manera de minimizar el potencial de dilución lateral se propone:
  - Controlar la formación de un espacio de aire cerca de la interfaz lateral con el material diluyente a través de la velocidad de extracción en quiebre para aquellos puntos colindantes. Lo anterior, con el fin de evitar el desprendimiento del material diluyente desde la interfaz lateral.
  - Mantener la inclinación de la pila de material granular con un ángulo inferior al ángulo de fricción del material diluyente a través del control de extracción sujeto a las restricciones de la tasa de incorporación de área y geometría del frente de extracción. De esta manera, será posible evitar el traslado del material diluyente por sobre la pila de material granular.

El análisis de la hipótesis de mecanismo de entrada lateral de la dilución propuesto indica que el proceso que da origen al movimiento lateral es factible desde el punto de vista mecánico bajo las condiciones presentes en una operación de panel caving. Además, los resultados de la utilización de la herramienta de simulación numérica indican que bajo las condiciones hipotéticas de propagación diferenciada del caving, se logran grandes desplazamientos laterales de las partículas de material diluyente.

## **8.2 RECOMENDACIONES Y ENFOQUE FUTURO**

Los resultados y conclusiones del presente trabajo de tesis permiten, en primer lugar, entregar recomendaciones acerca del futuro en la investigación y el diseño de prácticas de control de la dilución a través de la continuación del estudio de los mecanismos de entrada de dilución propuestos. En segundo lugar, y como resultado anexo, hacen posible entregar recomendaciones acerca de la herramienta numérica de simulación de flujo gravitacional REBOP en lo que respecta tanto a su validación y calibración como a su utilización como herramienta de planificación.

### **8.2.1 Mecanismos de entrada de dilución**

La comprensión íntegra de los mecanismos propuestos desde el punto de vista de las variables que los controlan en una operación de hundimiento es vital para el control de la entrada de la dilución. Luego, desde la perspectiva del autor, el trabajo futuro en este tema debe enfocarse en dos líneas:

- Medición del avance del cave back en la operación:  
Las estrategias de control de la dilución actuales deben incluir la propagación del cave back hacia el material diluyente como variable clave en los análisis. De esta manera, la generación de sistemas integrados de medición a través de distintas técnicas que incluyen mediciones de eventos sísmicos y gravimetría para medir el avance de la cavidad representan el primer paso hacia la inclusión de esta variable. Sólo contando con los datos de terreno será posible generar guías de control de dilución para cada operación.
- Modelamiento físico de los mecanismos propuestos:  
Junto con la mayor captura de datos clave para el estudio de la dilución en las operaciones, la aproximación a la manera en que operan los mecanismos de entrada de la dilución sujetos a distintas condiciones de borde a través de modelos físicos con variables controladas permite establecer relaciones entre variables al medir la influencia de cada una en el desplazamiento de las partículas de material diluyente. De esta manera, pueden replicarse diferentes condiciones de una operación para definir una estrategia que retrase la entrada de la dilución.

Además, se recomienda realizar una colección de los parámetros planteados en el modelo de entrada de dilución propuesto en el Capítulo 5 de manera de calibrarlo con datos de varias operaciones de panel caving. De esta forma, se podrá contar con un modelo de predicción del punto de entrada de dilución que represente una reproducción más realista del fenómeno que los construidos hasta ahora.

Finalmente, teniendo en cuenta los resultados de esta tesis y de trabajos que se están llevando a cabo actualmente (Armijo, 2012), se recomienda incorporar una subsidencia correctamente estimada a un eventual posterior análisis de Andina.

### **8.2.2 REBOP como herramienta de flujo**

Como corolario del trabajo de tesis, se desprende que si se desea utilizar la herramienta numérica REBOP para predecir las leyes y dilución asociadas a diferentes estrategias y planes de producción, se recomienda:

- Calibrar y validar para obtener los errores de predicción con datos de otros sectores productivos en la misma operación. Esto debe hacerse cuidando utilizar una parte de los datos para calibrar (2/3) y el resto para estimar el error predictivo (1/3), además de utilizar sectores que posean condiciones similares en lo que respecta a calidad de roca y condiciones de borde de la dilución a las del sector en que se busca realizar la predicción.

- Utilizar la fragmentación sólo como un indicador y no como un parámetro físico, e incluir un rango amplio de ésta en las simulaciones a realizar. En función de los resultados obtenidos, se recomienda utilizar un rango desde 0.01 m hasta 1m.
- No realizar necesariamente sensibilidades con respecto a la porosidad máxima y el ángulo de fricción. Los resultados muestran que las variaciones en la porosidad no influyen de manera significativa en la estimación de la entrada de dilución, mientras que los ángulos de fricción entre 20° y 50° no representan variaciones significativas en la geometría de los elipsoides de movimiento.
- No variar el ancho de carguío y la geometría de las bateas, puesto que los resultados obtenidos muestran que éstos no influyen en la generación de la geometría de los elipsoides de movimiento.
- Incluir perfiles de propagación de cave back, en lo posible provenientes de mediciones en la mina. De no contar con mediciones de la mina, se recomienda incorporar distintas relaciones de propagación en función de la extracción dependiendo de las condiciones de borde del material diluyente:
  - Si el sector a analizar se encuentra aledaño a un sector previamente explotado donde existe un potencial de dilución lateral, se recomienda probar diferentes relaciones de propagación de cave back en función de la cercanía a la fuente de dilución lateral. Mientras más cercano se encuentre el punto de extracción a la fuente, mayor razón de propagación. Además, se recomienda inducir colgaduras periódicas del cave back de manera de generar el espacio entre la pila granular y el cave back, y utilizar estimaciones de la subsidencia.
  - Si el sector a analizar se encuentra debajo de un sector previamente explotado, se recomienda probar distintas razones de propagación uniforme para todos los puntos.

De manera de mejorar la capacidad de REBOP para reproducir los desplazamientos laterales de la dilución, se recomienda incluir en el código las condiciones de desprendimiento del material diluyente desde la fuente lateral y de desplazamiento sobre la pila material granular presentados en el Capítulo 7, Sección 7.1.

# REFERENCIAS

- Armijo, F., 2012. Comunicación personal. Laboratorio de Block Caving, Universidad de Chile, Chile.
- Brown, E. T., 2004a. Geomechanics: the critical engineering discipline for mass mining. Proceedings MassMin 2004, Santiago. Instituto de Ingenieros de Chile, Chile.
- Brown, E. T., 2007. Block Caving Geomechanics (2<sup>nd</sup> edition). The International Caving Study 1997-2004. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- Carlson, G., Tyler, D., DeWolfe, C. and Lorig, L., 2004. Understanding gravity flow for mix and dilution modeling at Henderson Mine. Proceedings, MassMin 2004, Santiago. Instituto de Ingenieros de Chile, Chile.
- Castro, R., 2006. Study of the Mechanisms of Gravity Flow for Block Caving. Tesis doctoral, The University of Queensland, Australia.
- Castro, R., Trueman, R. y Halim, A., 2007. A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. Int. J. Rock Mech. Mining Sci.
- Castro, R., y Paredes, P., 2012. Comparison of REBOP to Large Panel Caving at CODELCO's operations. Final Internal Technical Report. Mass Mining Technology Project II. Toronto, Canada.
- Chitombo, G., 2005. End of Project Report – ICS II. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- Coulomb, C., 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. 7.
- De Nicola, R. y Fishwick, M., 2000. An underground air blast – CODELCO-Chile – Division Salvador. Proceedings, MassMin 2000, Brisbane, Australia. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australia.
- DeWolfe, V., 1981. Draw control in principle and practice at Henderson Mine. Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, (Ed: D. R. Stewart). Society of Mining Engineers, USA.
- Gustaffson, P., 1998. Waste rock content variations during gravity flow in sublevel caving. Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

- Hoek, E., 2004. Model to demonstrate how rockbolts work. [en línea] Hoek's corner < [http://www.rocscience.com/hoek/corner/15\\_Model\\_to\\_demonstrate\\_how\\_rockbolts\\_work.pdf](http://www.rocscience.com/hoek/corner/15_Model_to_demonstrate_how_rockbolts_work.pdf)>
- Itasca. 2007. A Rapid Gravity Flow Simulator. Proceedings of International Caving Study.
- Janssen, H., 2004 Experiments regarding grain pressure in silos written in 1895. Proceedings of MassMin 2004. *Instituto de Ingenieros de Chile, Chile*. pp 293-300.
- Jolley, D., 1968. Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mine. CIM.
- Julin, D., 1992. Block Caving. SME Mining Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Kvpil, R., 1965. Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bins I. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 2.
- Kvpil, R., 1992. Sublevel Caving. SME Mining Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition.
- Laubscher, D., 1994. Cave Mining – the state of the art. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Laubscher, D., 2000. Block Cave Manual. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
- Laubscher, D., 2006. Cave Mining Handbook. De Beers Group, South Africa.
- Lorig, J., and Cundall, P., 2000. A rapid gravity flow simulator. Final Report, ICS. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre and Itasca Consulting Group, Inc. Australia.
- Navarro, F., 2011. Syscave: Visualizador de Block Caving. Informe técnico interno. Laboratorio ALGES, Chile.
- Pielke, RA. 1984. Mesoscale Meteorological Modeling. 1<sup>st</sup> edition, Academic Press, New York
- Pierce, M., 2009. A model for gravity flow in block caving mines. PhD. Thesis. The University of Queensland, Australia.
- Power, G., 2004. Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modeling and full scale experiments. Tesis doctoral, The University of Queensland, Australia.

- Santibañez, J., 2008. Efecto del tiraje en la definición de la zona de movimiento, en un Block-Panel Caving, memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Chile.
- Susaeta, A., 2004a. Theory of gravity flow (Part 1). Proceedings MassMin 2004, Santiago. Instituto de Ingenieros de Chile, Chile.
- Susaeta, A., 2004b. Theory of gravity flow (Part 2). Proceedings MassMin 2004, Santiago. Instituto de Ingenieros de Chile, Chile.
- Susaeta, A., Rubio, E., Pais, G. y Enriquez, J., 2008. Dilution behaviour at Codelco panel cave mines. Proceedings of MassMin2008, Lulea, Sweden.
- Vargas, R., 2010. Metodología de diseño de malla de extracción en block y panel caving incorporando back-analisis, Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Universidad de Chile, Chile.
- Voronoi, G., 1908. Nouvelles applications des parametres continus a la theorie des formes quadratiques. Journal Fur Die Reine Und Angewandte Mathematik, Francia.

# ANEXO A.

## RESULTADOS REVISIÓN PRÁCTICA DE REBOP

A continuación se presentan los principales resultados de la revisión práctica de REBOP.

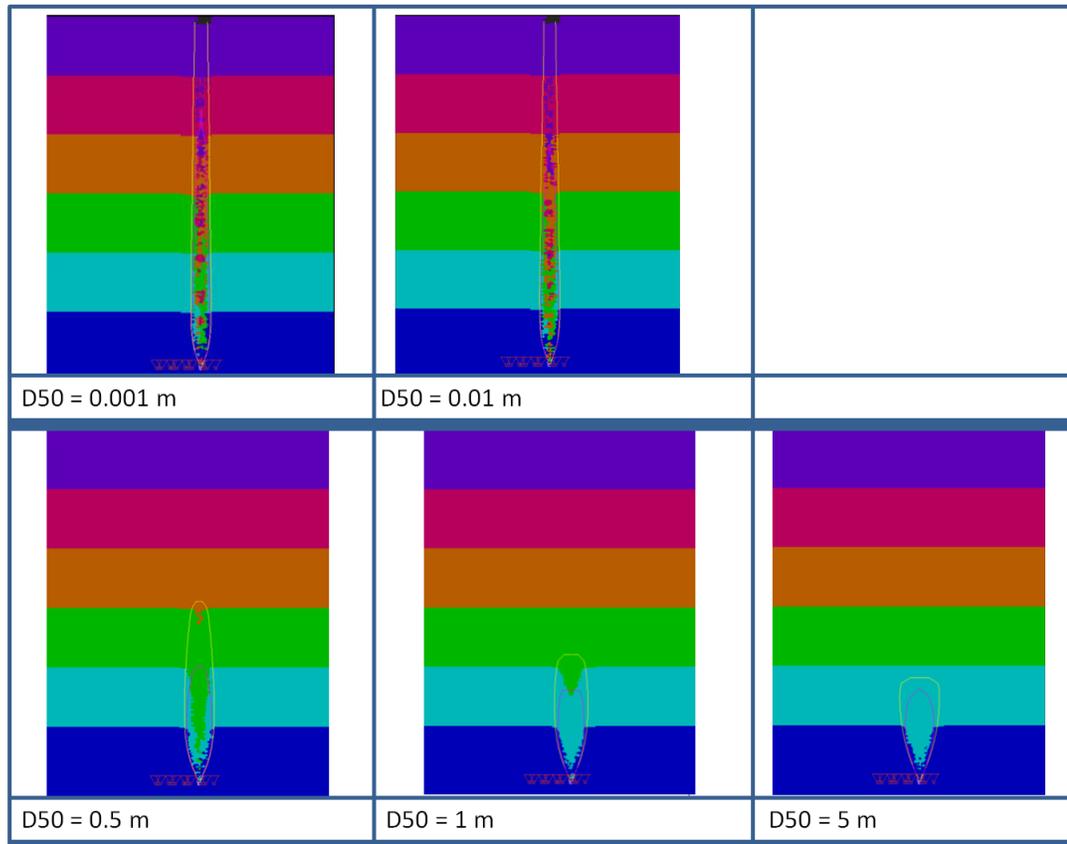


FIGURA 115: SIMULACIONES DE TIRAJE AISLADO EN REBOP. CONDICIONES: ALTURA DE COLUMNA = 600 (M), MASA EXTRAÍDA = 600,000 (T)

### Radio de IMZ v/s Altura de IMZ para distintas fragmentaciones (d50)

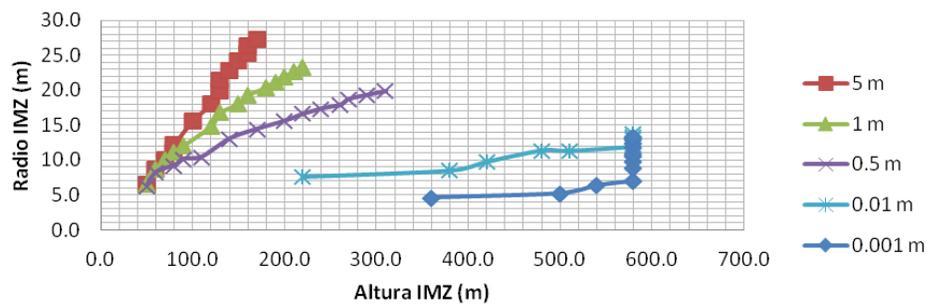


FIGURA 116: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DIFERENTES FRAGMENTACIONES

### Geometría IMZ para distintos saltos de porosidad (300,000 (t))

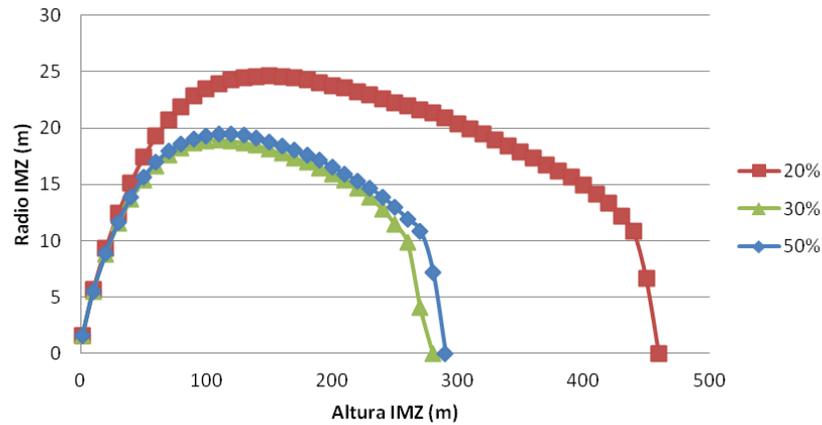


FIGURA 117: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DIFERENTES POROSIDADES MÁXIMAS. CONDICIÓN: MASA EXTRAÍDA = 300,000 (T)

### Geometría IMZ para distintos ángulos de fricción (300,000(t))

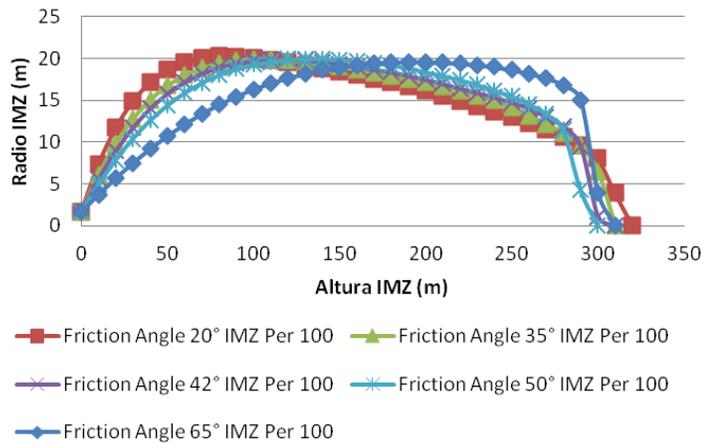
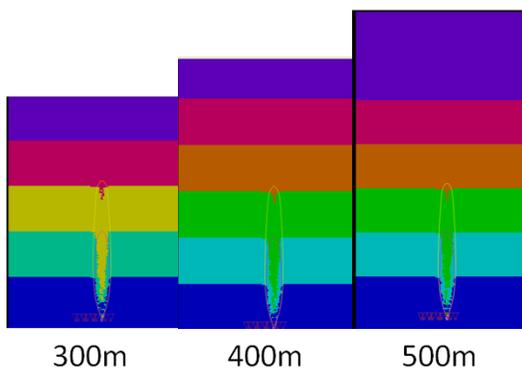


FIGURA 118: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE FRICCIÓN. CONDICIÓN: MASA EXTRAÍDA = 300,000 (T)



### Geometría IMZ para distinta sobrecarga (HOD) (300,000 (t))

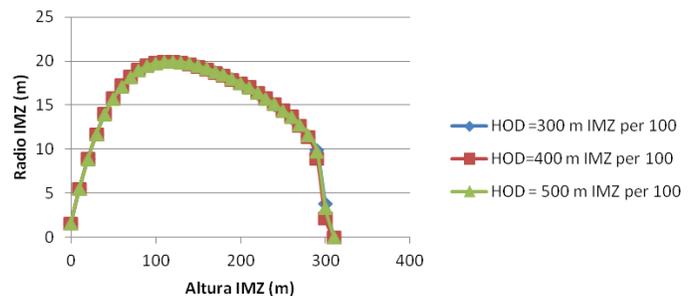


FIGURA 119: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DISTINTA SOBRECARGA. CONDICIÓN: MASA EXTRAÍDA = 300,000 (T)

### Geometría IMZ para distintos anchos de carguío(DP Width) (300,000 (t))

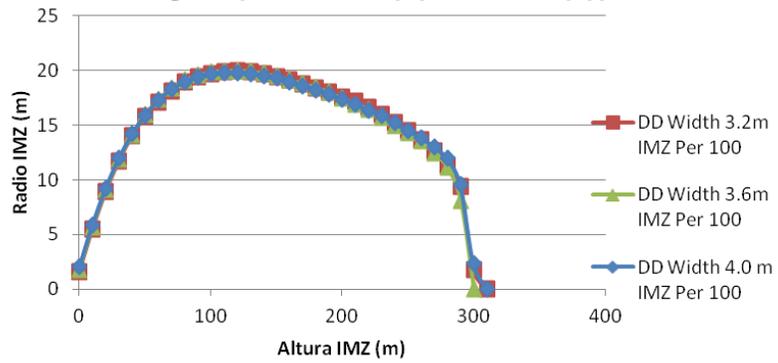


FIGURA 120: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DISTINTOS ANCHOS DE CARGUÍO. CONDICIÓN: MASA EXTRAÍDA = 300,000 (T)

### Geometría IMZ para distintos ángulos de batea (Side Angle) (300,000 (t))

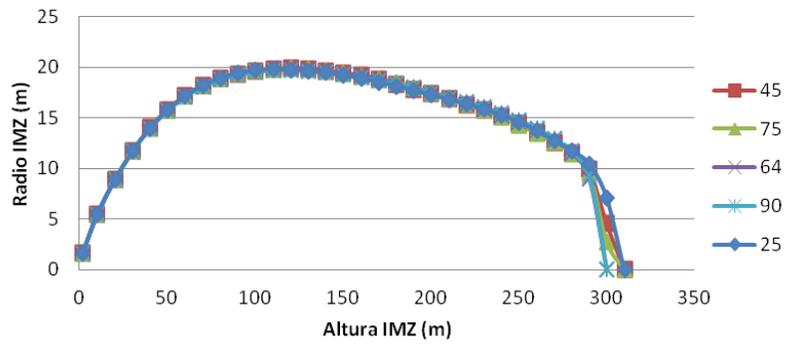


FIGURA 121: RADIO DE IMZ V/S ALTURA DE IMZ PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE BATEA. CONDICIÓN: MASA EXTRAÍDA = 300,000 (T)

# ANEXO B.

## RESULTADOS COMPARACIÓN DE REBOP CON DATOS DE MINAS

En esta sección se muestran en detalles los resultados de la comparación de REBOP con datos de minas.

### B.1 EL TENIENTE

La Tabla 43 muestra los resultados de las simulaciones en términos del error en la predicción de los tonelajes extraídos, es posible apreciar que éstos no superan el 7% de error relativo medio a escala mensual. La Tabla 44 muestra los errores de las simulaciones en términos de leyes de cobre extraídas, es posible apreciar que los errores de los sectores Diablo Regimiento y Esmeralda no superan el 7.3% del error relativo medio a escala mensual, mientras que el sector Reservas Norte posee un error del 16.4%.

TABLA 43: ERRORES PARA TONELAJES EXTRAÍDOS EN SIMULACIONES DE EL TENIENTE

| Sector | Tonelaje extraído medio (kton/mes) | RMSE (kton) | Error relativo medio mensual (%) |
|--------|------------------------------------|-------------|----------------------------------|
| DR     | 324.7                              | 12.3        | 3.8%                             |
| ES     | 666.9                              | 40.6        | 6.1%                             |
| RENO   | 345                                | 6.0         | 1.7%                             |

TABLA 44: ERRORES PARA LEYES DE CU EXTRAÍDAS EN SIMULACIONES DE EL TENIENTE

| Sector | Ley de Cu extraída media (% mensual) | RMSE (%) | Error relativo medio mensual (%) |
|--------|--------------------------------------|----------|----------------------------------|
| DR     | 0.9                                  | 0.07     | 7.3%                             |
| ES     | 1.2                                  | 0.08     | 7.0%                             |
| RENO   | 0.9                                  | 0.15     | 16.4%                            |

Las figuras a continuación muestran los datos de extracción de los sectores de El Teniente.

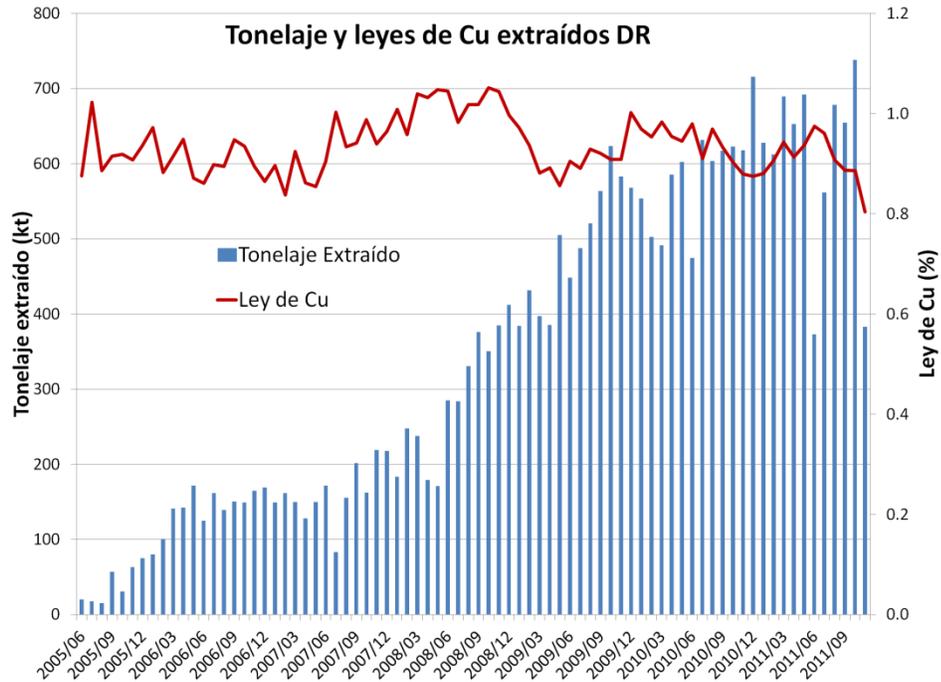


FIGURA 122: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS DIABLO REGIMIENTO

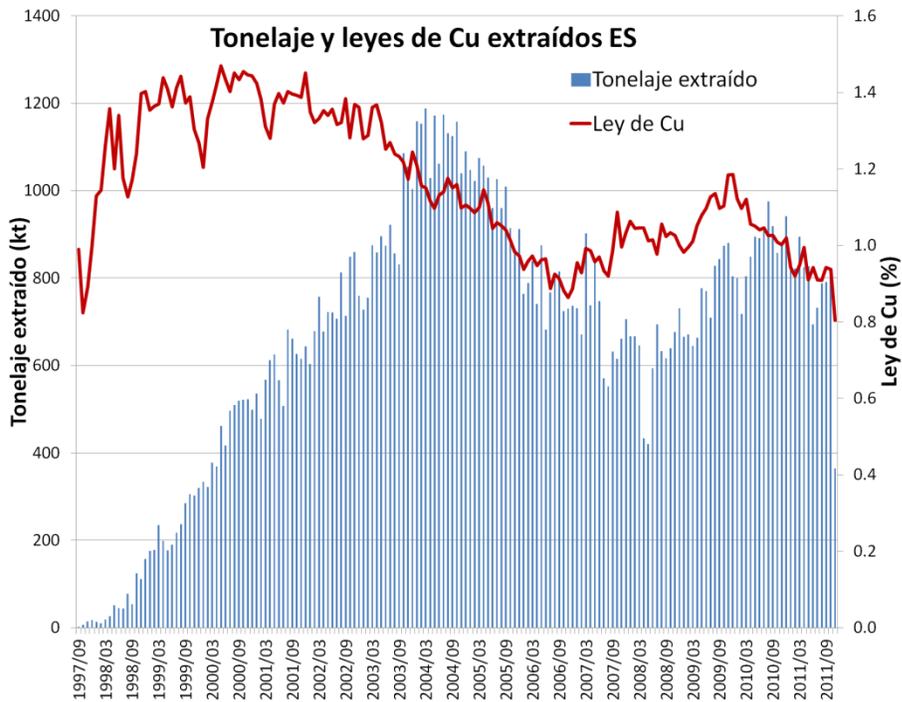


FIGURA 123: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS ESMERALDA

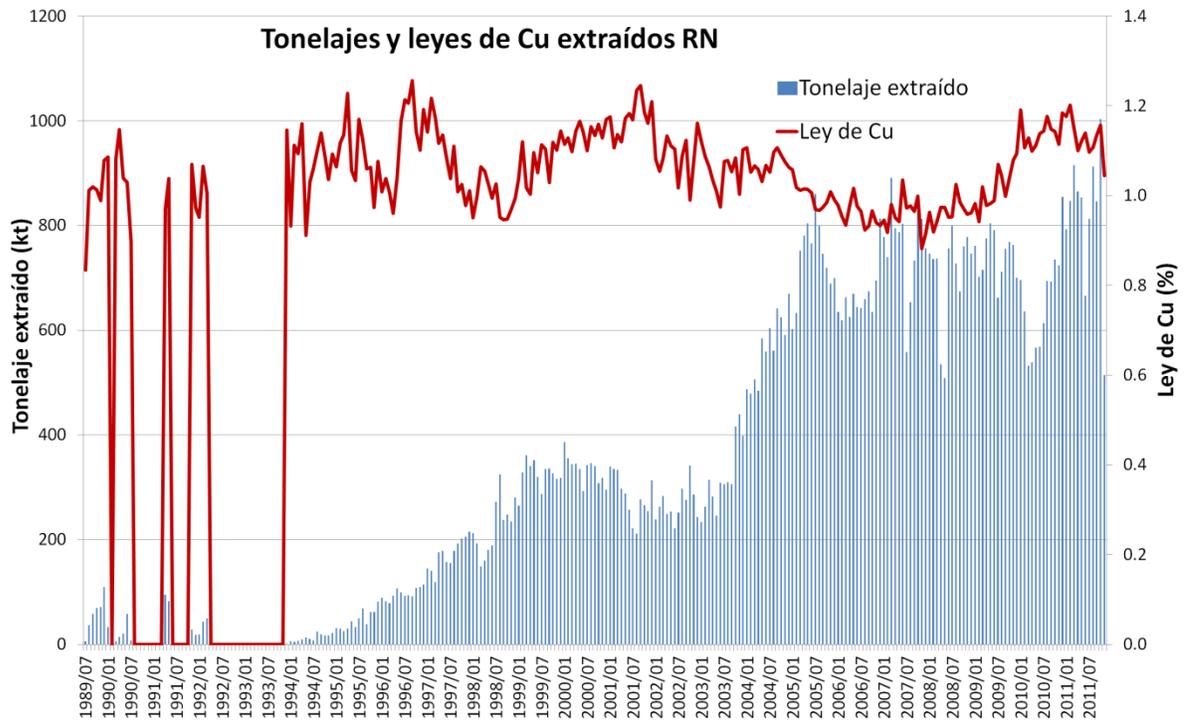


FIGURA 124: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS RESERVAS NORTE

Las figuras a continuación muestran los tonelajes extraídos y simulados por REBOP para los sectores de El Teniente.

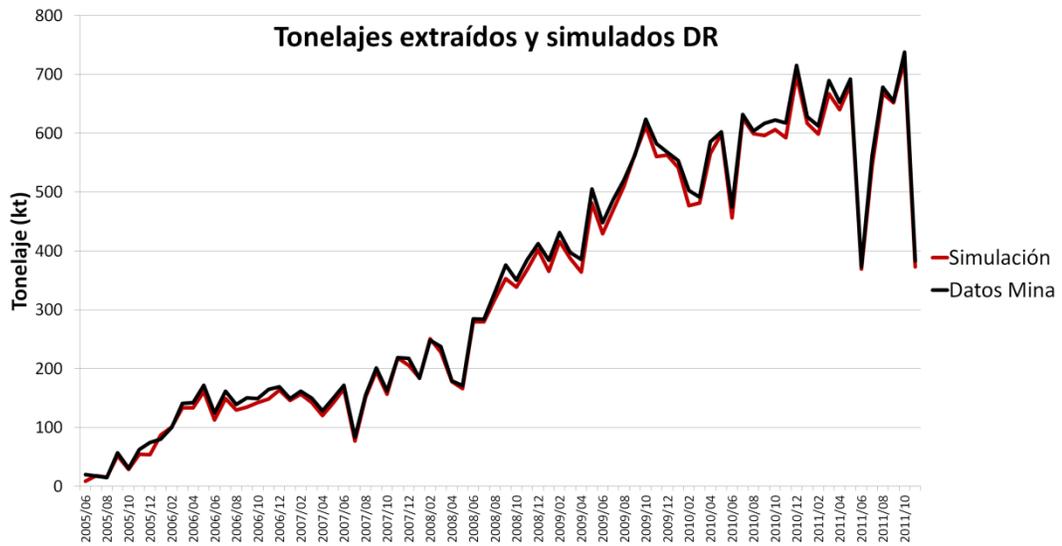


FIGURA 125: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS DIABLO REGIMIENTO



FIGURA 126: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS ESMERALDA

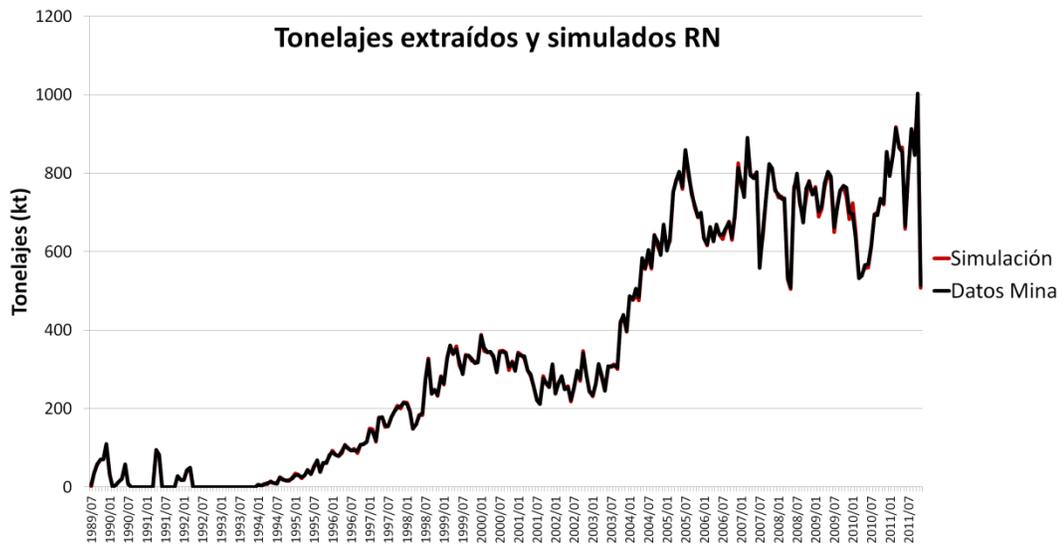


FIGURA 127: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS RESERVAS NORTE

Las figuras a continuación muestran las leyes de Cu extraídas y simuladas por REBOP para los sectores de El Teniente.

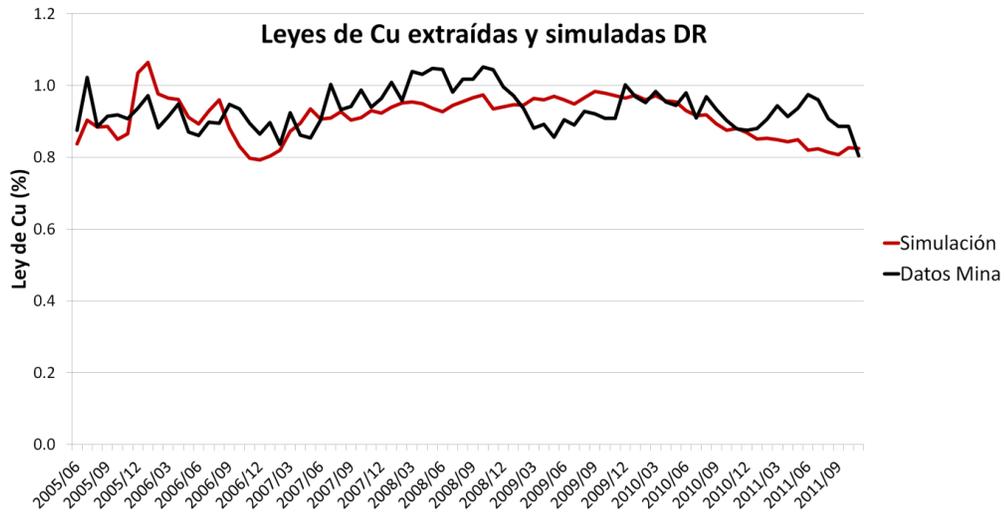


FIGURA 128: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS DIABLO REGIMIENTO

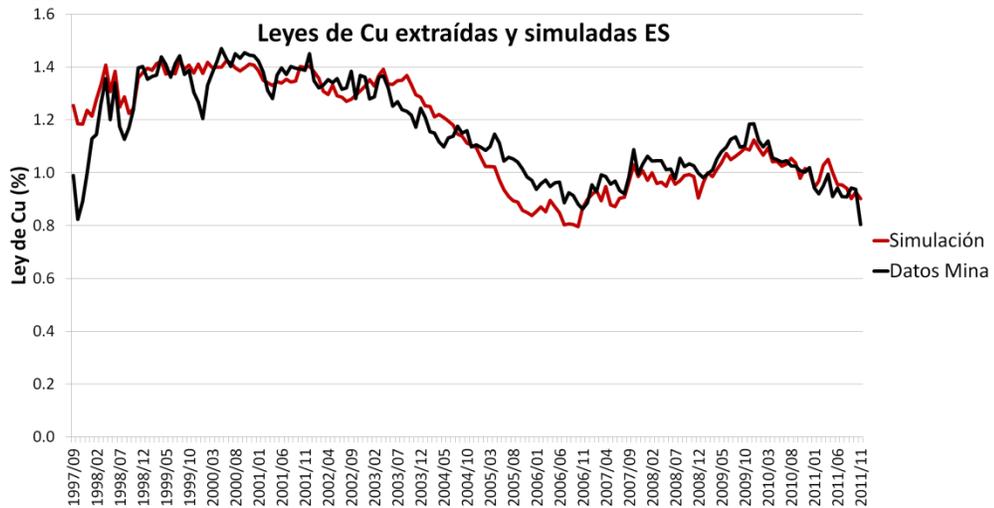


FIGURA 129: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS ESMERALDA

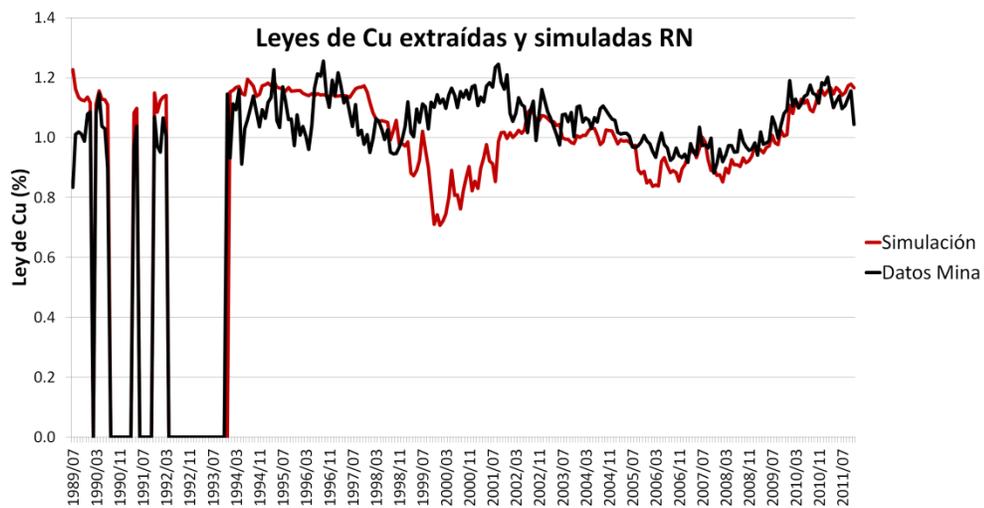


FIGURA 130: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS RESERVAS NORTE

## B.2 EL SALVADOR

La Tabla 45, la Tabla 46, la Tabla 47 y la Tabla 48 resumen los resultados y el análisis para los sectores Inca Central Este, Inca Central Oeste, Inca Norte e Inca Oeste, respectivamente.

TABLA 45: RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA SECTOR INCA CENTRAL ESTE

| ICE  | Datos Mina   |          | Simulaciones   |                  |                                  |                |
|--|--|----------|--|------------------|----------------------------------|----------------|
| <b>Comportamiento de entrada de la dilución</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción de este sector parte desde las columnas in-situ más bajas (bajo 50 (m)) hacia las más altas (sobre 400 (m)).</li> <li>➤ En el sentido de la secuencia se observa que la entrada de dilución se hace cada vez más temprana hasta la barrera generada por los puntos de vaciado.</li> <li>➤ El mecanismo de entrada de dilución es <b>lateral</b> proveniente del norte del sector.</li> </ul> |          | <p>El análisis de la entrada de la dilución en las simulaciones estimada a través del PEQ(3%) muestra que las simulaciones de fragmentación gruesa tienden a sobrestimar la entrada de dilución para los puntos del norte y el centro del sector, y para los puntos del sur, no muestran entrada de dilución al igual que en los datos minas.</p> <p>Esto permite concluir que las simulaciones no son capaces de reproducir el mecanismo de entrada lateral para los puntos del centro y sólo reproducen la entrada vertical del material quebrado.</p> |                  |                                  |                |
| <b>Tonelaje a escala de plan de producción</b>                       | Tonelaje medio extraído (kt, mensual)  | 57.7     | SET  | RMSE (kt)        | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |  |          | 1  | 2                | 3%                               |                |
|  |  |          | 2  | 0.2              | 0.3%                             |                |
|  |  |          | 3  | 10.9             | 19%                              |                |
|  |  |          | 4  | 0.3              | 1%                               |                |
| <b>Entrada de dilución en el plan de producción (fecha)</b>          | Octubre 2003 (Oct-03)  |          | SET  | P_PEQ            | Dif. En periodos                 |                |
|  |  |          | 1  | Ago-03           | -2                               |                |
|  |  |          | 2  | Ago-03           | -2                               |                |
|  |  |          | 3  | Sep-03           | -1                               |                |
|  |  |          | 4  | Ago-03           | -2                               |                |
| <b>Punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción</b> | PED(3%) medio  | 57 ±[54] | SET  | Confiability (%) | RMSE (%)                         | PEQ medio (3%) |
|  |  |          | 1  | 79               | 76                               | 83 ±[28]       |
|  |  |          | 2  | 75               | 90                               | 85 ±[33]       |
|  |  |          | 3  | 77               | 59                               | 30 ±[13]       |
|  |  |          | 4  | 73               | 60                               | 21 ±[11]       |
| <b>Leyes de Cu a escala de plan de producción</b>                    | Ley de Cu media extraída (% , mensual)   | 0.56     | SET  | RMSE (%)         | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |  |          | 1  | 0.12             | 21%                              |                |
|  |  |          | 2  | 0.12             | 21%                              |                |
|  |  |          | 3  | 0.1              | 18%                              |                |
|  |  |          | 4  | 0.13             | 23%                              |                |

TABLA 46: RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA SECTOR INCA CENTRAL OESTE

| ICW  | Datos Mina  |           | Simulaciones   |                   |                                  |                |
|--|---|-----------|--|-------------------|----------------------------------|----------------|
| <b>Comportamiento de entrada de la dilución</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción de este sector parte de alturas de columna in-situ de 130 (m) (zona 1), pasando por alturas de columna sobre los 200 (m) (zona 2) y vuelve a tomar por alturas de columna de 130 (m) (zona 3).</li> <li>➤ El PED(3%) va desde 40 a 100% para la zona 1, luego se incrementa sobre el 100% para la zona 2, y va desde 80% a sobre 100% en la zona 3.</li> <li>➤ El Mecanismo de entrada de dilución es <b>vertical</b> proveniente del sector previamente explotado ubicado sobre el ICW.</li> </ul> |           | En términos generales, las simulaciones con fragmentación gruesa reproducen las leyes, tonelajes y entrada de dilución en términos de la confiabilidad y el error relativo medio del sector. |                   |                                  |                |
| <b>Tonelaje a escala de plan de producción</b>                       | Tonelaje medio extraído (kt, mensual)   | 259.5     | SET  | RMSE (kt)         | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |           | 1  | 20.6              | 8%                               |                |
|  |   |           | 2  | 13.9              | 5%                               |                |
|  |   |           | 3  | 59.9              | 23%                              |                |
|  |   |           | 4  | 14.5              | 6%                               |                |
| <b>Entrada de dilución en el plan de producción (fecha)</b>          | Mayo 2000 (May-00)  |           | SET  | P_PEQ             | Dif. en períodos                 |                |
|  |   |           | 1  | Sep-00            | 4                                |                |
|  |   |           | 2  | Jun-00            | 1                                |                |
|  |   |           | 3  | Sep-00            | 4                                |                |
|  |   |           | 4  | Jun-00            | 1                                |                |
| <b>Punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción</b> | PED(3%) medio   | 103 ±[40] | SET  | Confiabilidad (%) | RMSE (%)                         | PEQ medio (3%) |
|  |   |           | 1  | 82                | 41                               | 82 ±[33]       |
|  |   |           | 2  | 84                | 37                               | 96 ±[23]       |
|  |   |           | 3  | 74                | 90                               | 30 ±[18]       |
|  |   |           | 4  | 63                | 100                              | 13 ±[4]        |
| <b>Leyes de Cu a escala de plan de producción</b>                    | Ley de Cu media extraída (% , mensual)  | 0.64      | SET  | RMSE (%)          | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |           | 1  | 0.08              | 13%                              |                |
|  |   |           | 2  | 0.08              | 13%                              |                |
|  |   |           | 3  | 0.17              | 27%                              |                |
|  |   |           | 4  | 0.17              | 27%                              |                |

TABLA 47: RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA SECTOR INCA NORTE

| IN   | Datos Mina  |          | Simulaciones   |                  |                                  |                |
|--|---|----------|--|------------------|----------------------------------|----------------|
| <b>Comportamiento de entrada de la dilución</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La secuencia de extracción del sector parte desde alturas de columna in-situ bajo los 100 (m) hacia columnas de 150 (m) (mayor parte de los puntos) y encuentra columnas sobre los 200 (m) al final.</li> <li>➤ En el sentido de la secuencia la entrada de la dilución se va haciendo más temprana hasta la zona central del sector (PED(3%) bajo el 40%) y luego aumenta el PED(3%) en la zona norte.</li> <li>➤ El mecanismo de entrada de dilución en la zona central es <b>lateral</b> proveniente del sur del sector.</li> </ul> |          | <p>En términos generales, REBOP reproduce las leyes, tonelajes y entrada de dilución a escala de plan de producción.</p> <p>La simulación con fragmentación gruesa y propagación de cave back muestra altos PEQ(3%) para los puntos del sur, bajos PEQ(3%) para la zona central y altos PEQ(3%) para la zona norte, lo cual representa un comportamiento cualitativamente similar a lo observado en la mina. Sin embargo, la simulación tiende a sobrestimar el PEQ(3%) para la mayoría de los puntos.</p> |                  |                                  |                |
| <b>Tonelaje a escala de plan de producción</b>                       | Tonelaje medio extraído (kt, mensual)   | 297.6    | SET  | RMSE (kt)        | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |          | 1  | 88.9             | 30%                              |                |
|  |   |          | 2  | 19               | 6%                               |                |
|  |   |          | 3  | 60.6             | 20%                              |                |
|  |   |          | 4  | 5                | 2%                               |                |
| <b>Entrada de dilución en el plan de producción (fecha)</b>          | Marzo 1995 (Mar-95)   |          | SET  | P_PEQ            | Dif. en períodos                 |                |
|  |   |          | 1  | May-95           | 2                                |                |
|  |   |          | 2  | Sep-94           | -6                               |                |
|  |   |          | 3  | Mar-95           | 0                                |                |
|  |   |          | 4  | Oct-94           | -5                               |                |
| <b>Punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción</b> | PED(3%) medio   | 78 ±[70] | SET  | Confiability (%) | RMSE (%)                         | PEQ medio (3%) |
|  |   |          | 1  | 73               | 75                               | 71 ±[43]       |
|  |   |          | 2  | 73               | 73                               | 104 ±[33]      |
|  |   |          | 3  | 68               | 83                               | 44 ±[20]       |
|  |   |          | 4  | 64               | 89                               | 24 ±[15]       |
| <b>Leyes de Cu a escala de plan de producción</b>                    | Ley de Cu media extraída (% , mensual)  | 0.57     | SET  | RMSE (%)         | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |          | 1  | 0.12             | 21%                              |                |
|  |   |          | 2  | 0.07             | 12%                              |                |
|  |   |          | 3  | 0.16             | 28%                              |                |
|  |   |          | 4  | 0.14             | 25%                              |                |

TABLA 48: RESUMEN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA SECTOR INCA OESTE

| IW   | Datos Mina  |          | Simulaciones   |                   |                                  |                |
|--|---|----------|--|-------------------|----------------------------------|----------------|
| <b>Comportamiento de entrada de la dilución</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La ocurrencia de un air blast debido a una colgadura del cave back al inicio de la secuencia sugiere que la entrada de la dilución queda controlada por la propagación repentina de éste y la aparición de material diluyente luego del evento.</li> </ul> |          | Las simulaciones no incluyen la colgadura del cave back durante el inicio de la secuencia. De esta manera, el punto de entrada de dilución a escala de plan de producción simulado no reproduce la realidad. Las otras variables simuladas (leyes y tonelajes) son reproducidas por la simulación de fragmentación gruesa en flujo granular. |                   |                                  |                |
| <b>Tonelaje a escala de plan de producción</b>                       | Tonelaje medio extraído (kt, mensual)   | 164.4    | SET  | RMSE (kt)         | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |          | 1  | 36.8              | 22%                              |                |
|  |   |          | 2  | 0.1               | 0.1%                             |                |
|  |   |          | 3  | 58.1              | 35%                              |                |
|  |   |          | 4  | 3.5               | 2%                               |                |
| <b>Entrada de dilución en el plan de producción (fecha)</b>          | Febrero 2000 (Feb-00)   |          | SET  | P_PEQ             | Dif. en períodos                 |                |
|  |   |          | 1  | May-03            | 39                               |                |
|  |   |          | 2  | May-03            | 39                               |                |
|  |   |          | 3  | Ene-00            | -1                               |                |
|  |   |          | 4  | Feb-96            | -48                              |                |
| <b>Punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción</b> | PED(3%) medio   | 67 ±[48] | SET  | Confiabilidad (%) | RMSE (%)                         | PEQ medio (3%) |
|  |   |          | 1  | 79                | 66                               | 100 ±[45]      |
|  |   |          | 2  | 82                | 67                               | 102 ±[37]      |
|  |   |          | 3  | 72                | 59                               | 46 ±[21]       |
|  |   |          | 4  | 70                | 70                               | 17 ±[10]       |
| <b>Leyes de Cu a escala de plan de producción</b>                    | Ley de Cu media extraída (% , mensual)  | 0.54     | SET  | RMSE (%)          | Error relativo medio mensual (%) |                |
|  |   |          | 1  | 0.07              | 13%                              |                |
|  |   |          | 2  | 0.05              | 9%                               |                |
|  |   |          | 3  | 0.12              | 22%                              |                |
|  |   |          | 4  | 0.12              | 22%                              |                |

Las figuras a continuación muestran los tonelajes extraídos y simulados por REBOP para los sectores de El Salvador.

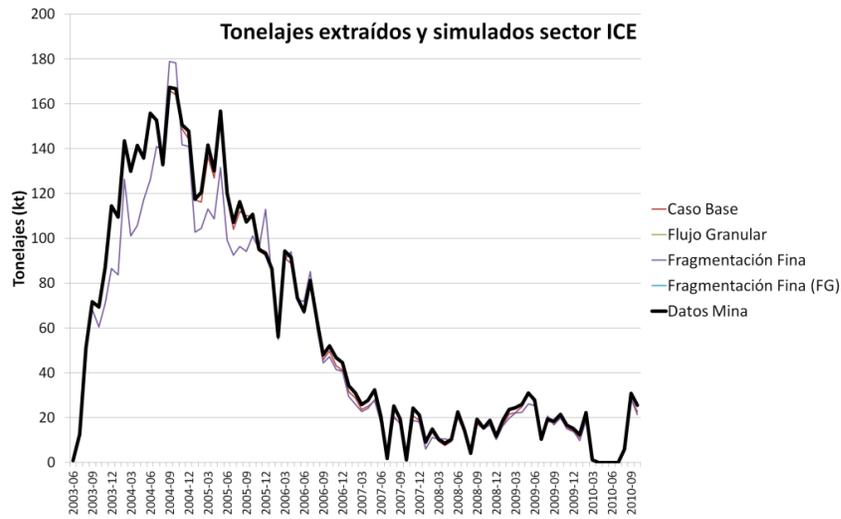


FIGURA 131: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS SECTOR INCA CENTRAL ESTE



FIGURA 132: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS SECTOR INCA CENTRAL OESTE

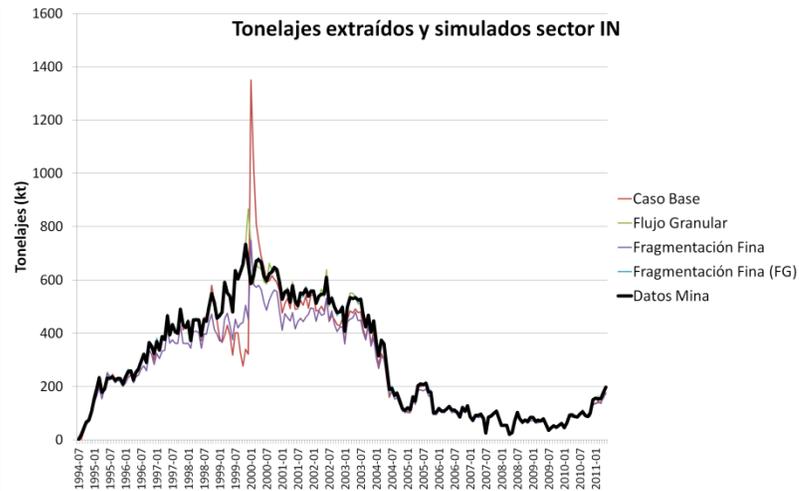


FIGURA 133: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS SECTOR IN



FIGURA 134: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS SECTOR IW

Las figuras a continuación muestran las leyes de cobre extraídas y simuladas por REBOP para los sectores de El Salvador.

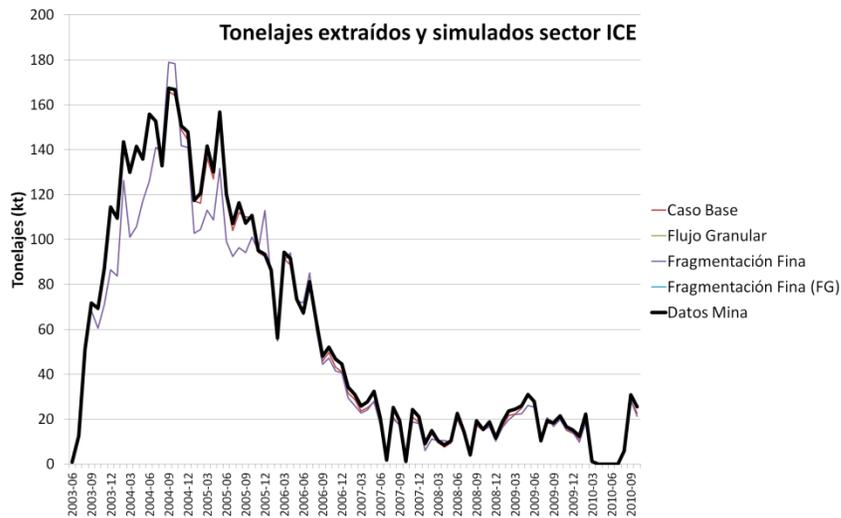


FIGURA 135: LEYES DE CU EXTRAÍDOS Y SIMULADAS SECTOR INCA CENTRAL ESTE

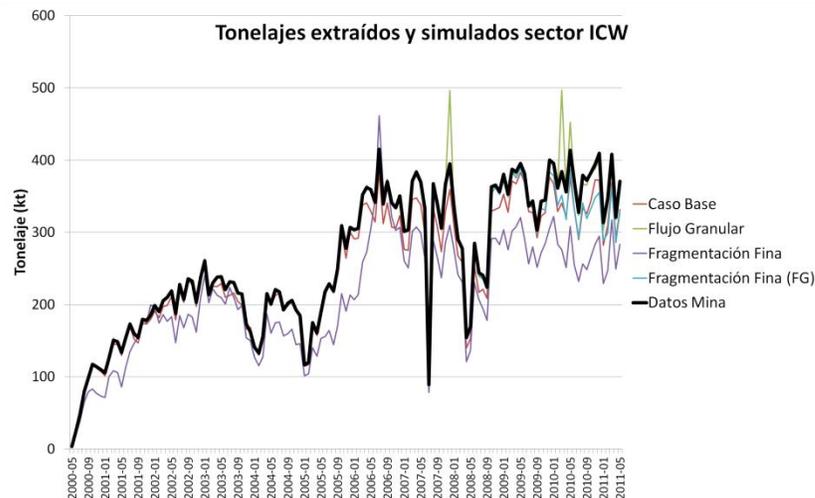


FIGURA 136: LEYES DE CU EXTRAÍDOS Y SIMULADAS SECTOR INCA CENTRAL OESTE

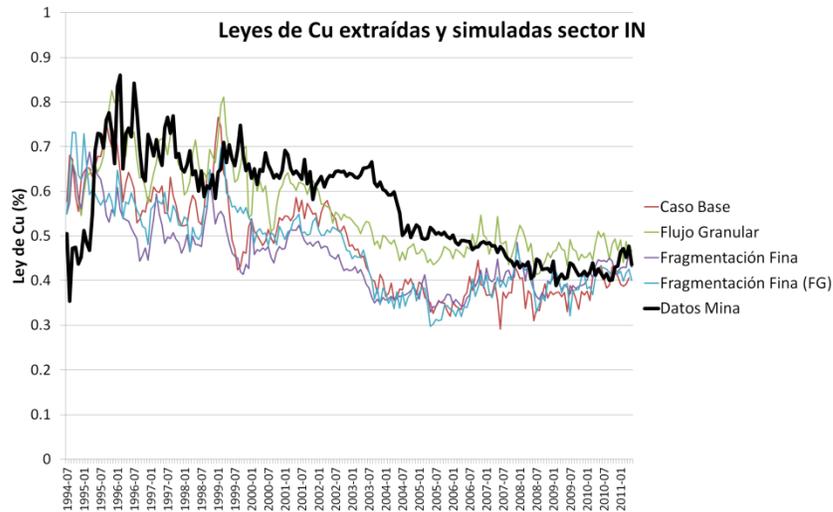


FIGURA 137: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS SECTOR INCA NORTE

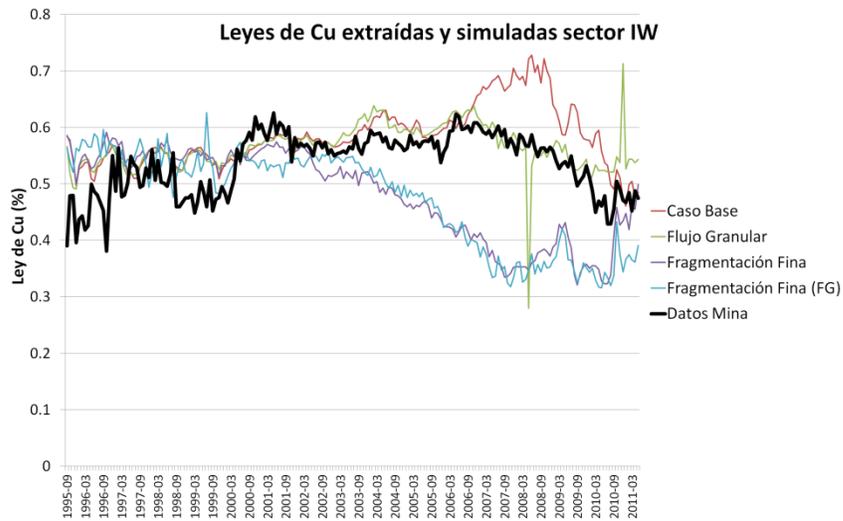


FIGURA 138: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS SECTOR INCA OESTE

Las figuras a continuación muestran el contenido de dilución extraído y el contenido de quebrado simulado por REBOP para los sectores de El Salvador.

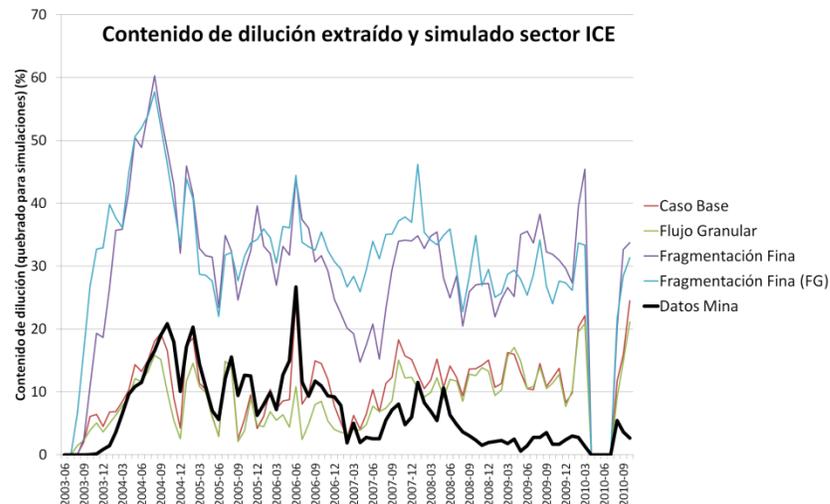


FIGURA 139: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO Y DE QUEBRADO SIMULADO SECTOR ICE

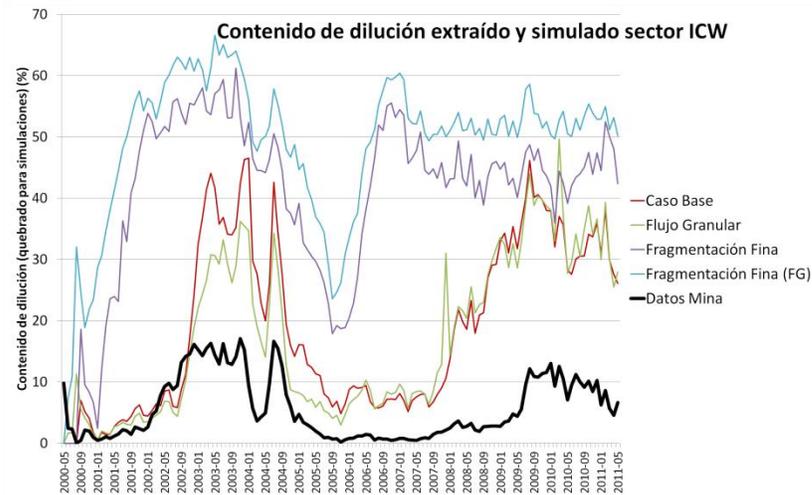


FIGURA 140: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO Y DE QUEBRADO SIMULADO SECTOR ICW

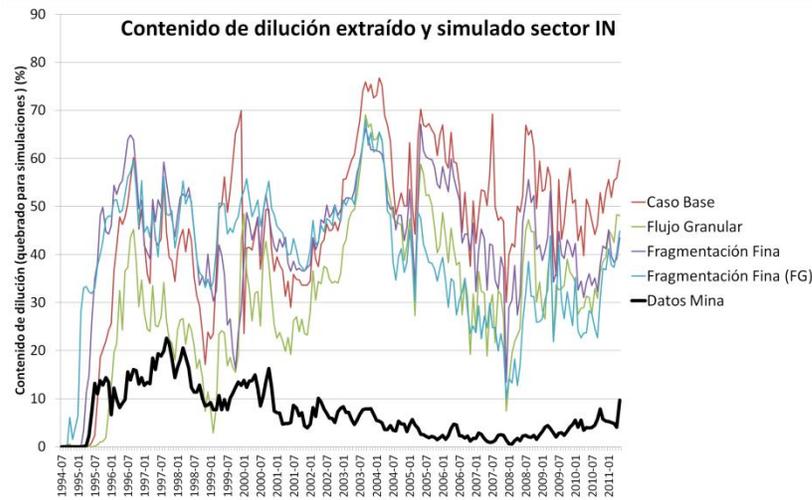


FIGURA 141: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO Y DE QUEBRADO SIMULADO SECTOR IN

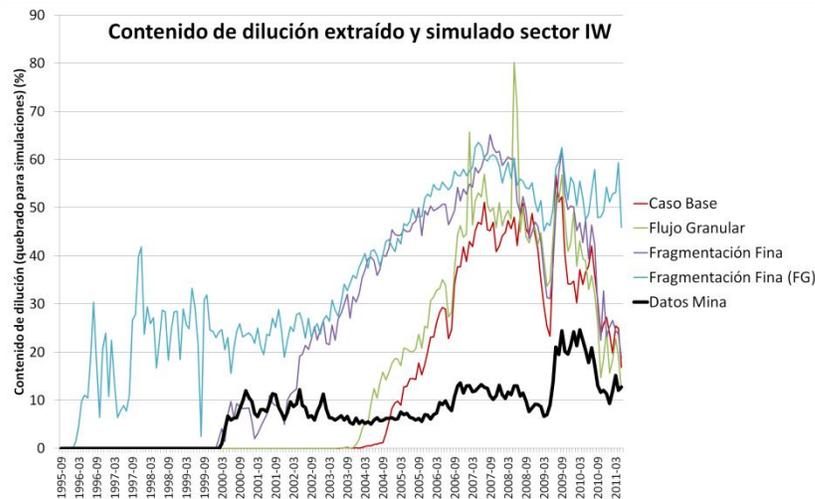


FIGURA 142: CONTENIDO DE DILUCIÓN EXTRAÍDO Y DE QUEBRADO SIMULADO IW

Las figuras a continuación muestran el punto de entrada de dilución a escala de puntos de extracción (PED(3%)) de los datos mina junto con el PEQ(3%) simulado por REBOP para los sectores de El Salvador en vistas en planta.

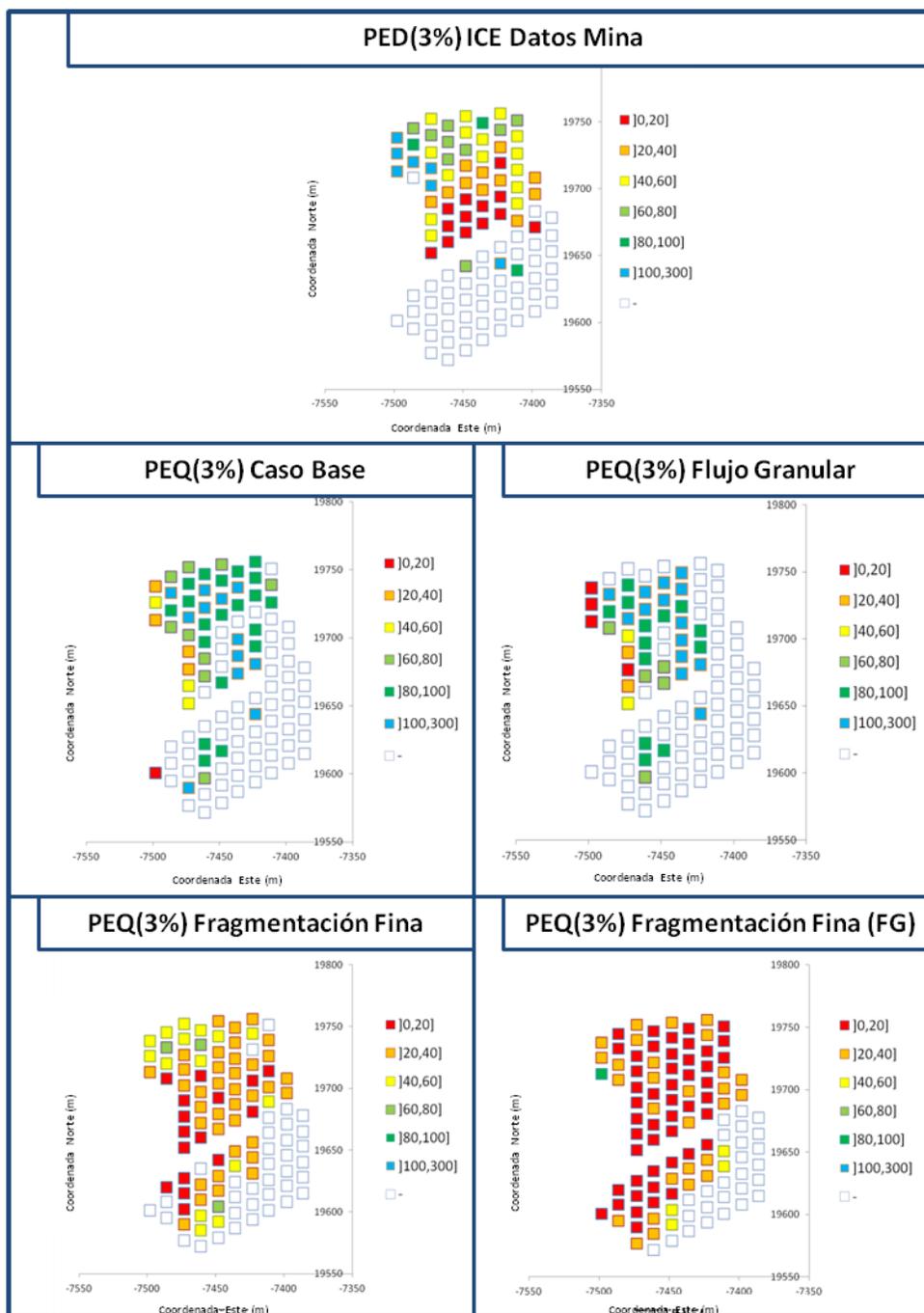


FIGURA 143: VISTAS EN PLANTA PED(3%) DATOS MINA Y PEQ(3%) SIMULADO SECTOR INCA CENTRAL ESTE

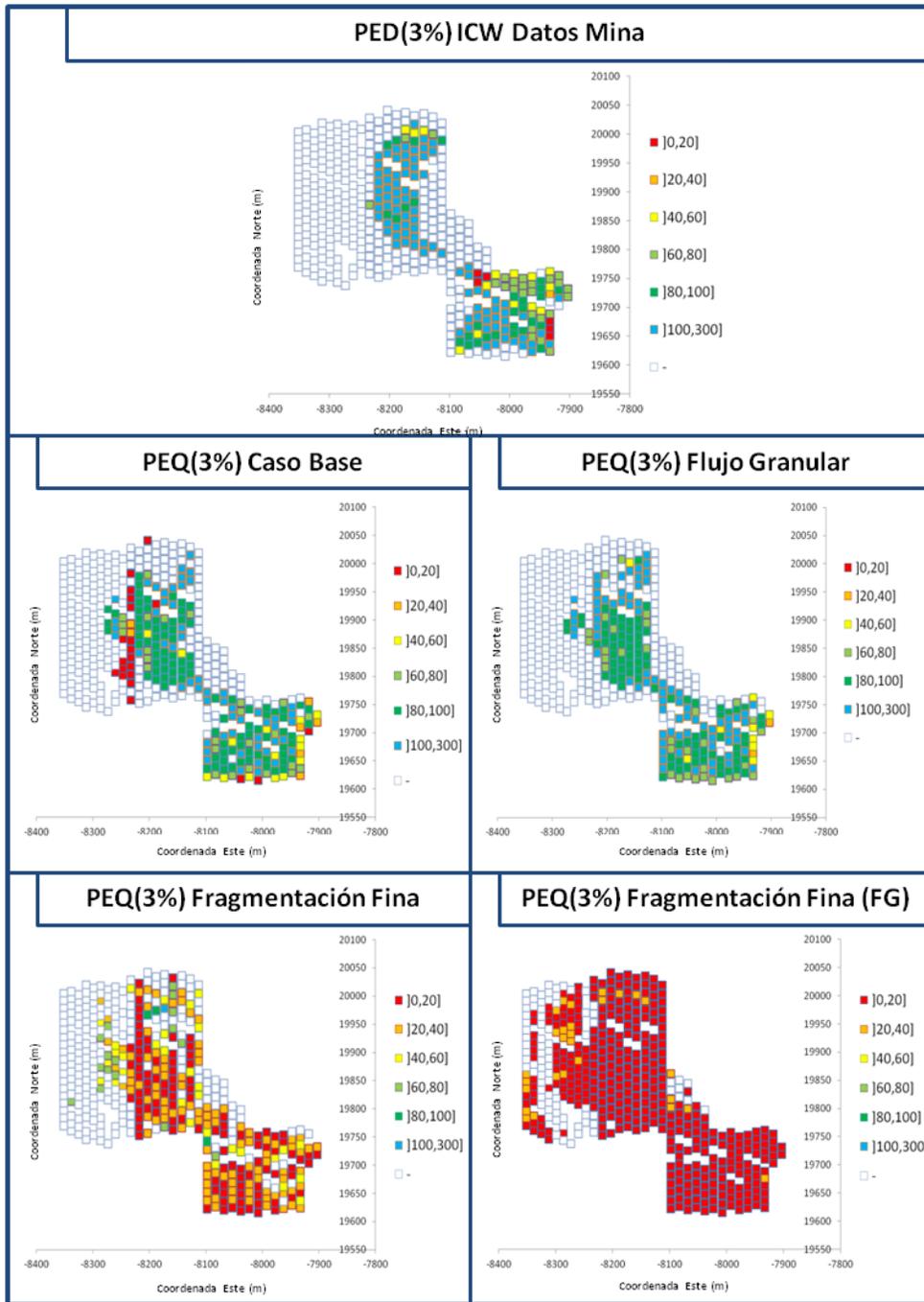


FIGURA 144: VISTAS EN PLANTA PED(3%) DATOS MINA Y PEQ(3%) SIMULADO SECTOR INCA CENTRAL OESTE

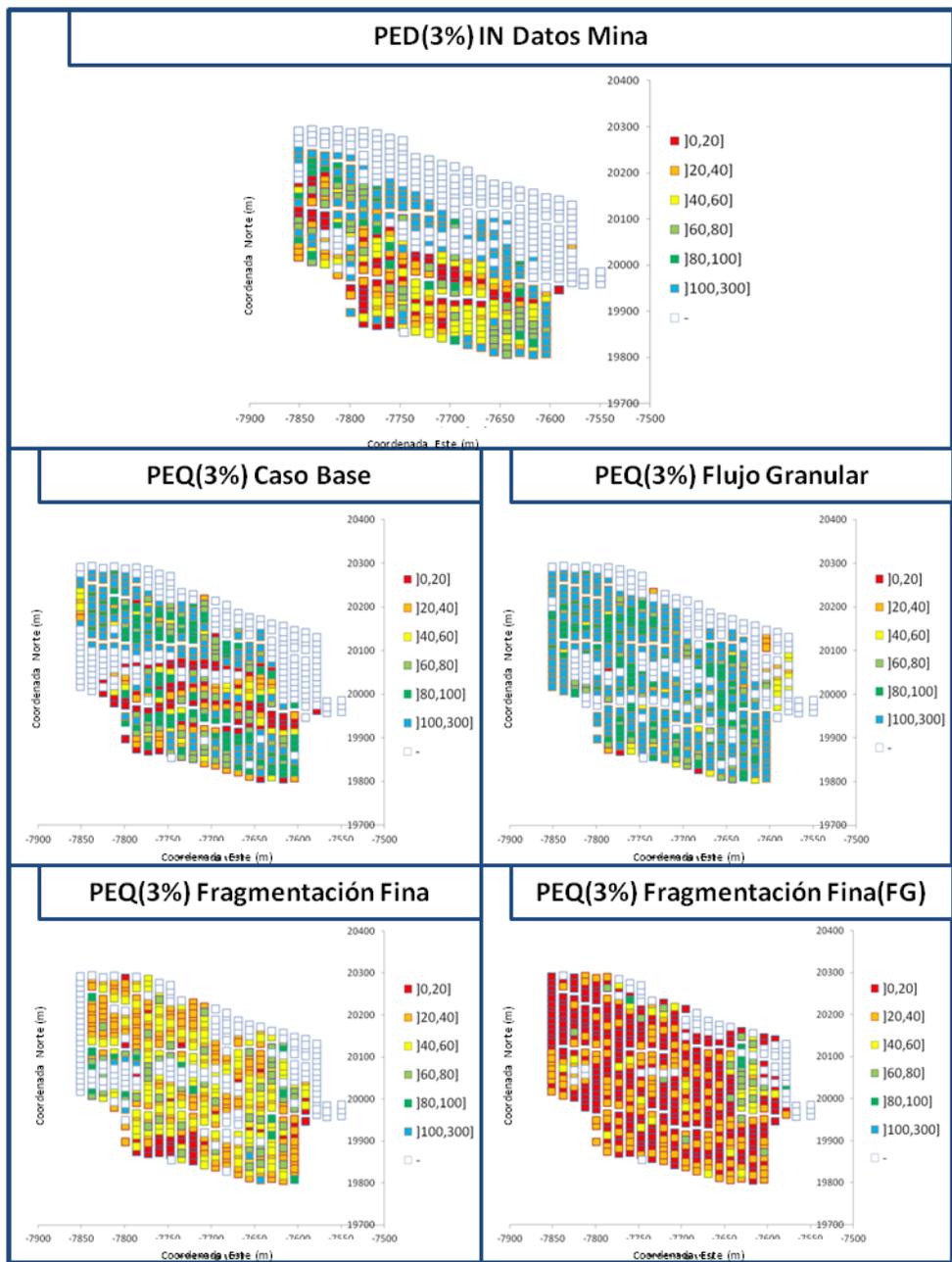


FIGURA 145: VISTAS EN PLANTA PED(3%) DATOS MINAS Y PEQ(3%) SIMULADO SECTOR INCA NORTE

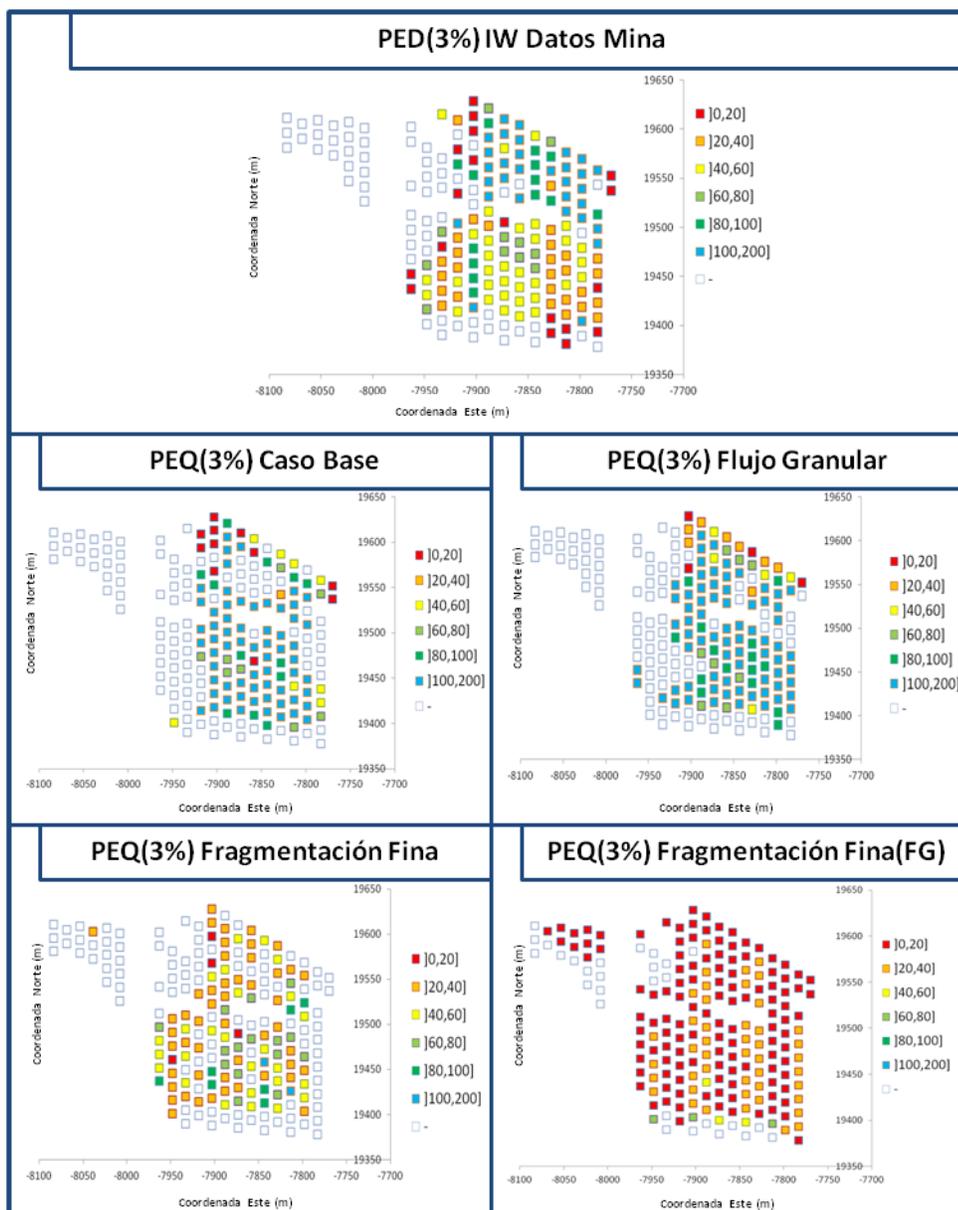


FIGURA 146: VISTAS EN PLANTA PED(3%) DATOS MINA Y PEQ(3%) SIMULADO SECTOR INCA OESTE

### B.3 ANDINA

La Tabla 49 muestra los resultados para la comparación de las simulaciones con la extracción histórica del Panel III en términos de leyes de cobre. Es posible apreciar que la simulación de fragmentación diferenciada posee el menor error relativo medio mensual, que corresponde al 9%.

TABLA 49: ERRORES EN LEYES DE CU EXTRAÍDAS PARA SIMULACIONES DE PANEL III

| <b>Ley de Cu extraída media en datos mina (% , mensual)</b> | <b>1.19</b> | <b>SET</b> | <b>Nombre de la simulación</b>  | <b>RMSE (%)</b> | <b>Error relativo medio mensual (%)</b> |
|---|-------------|------------|---------------------------------|-----------------|---|
|   |             | 1          | Caso Base                       | 0.11            | 9%                                      |
|   |             | 2          | Flujo Granular                  | 0.11            | 9%                                      |
|   |             | 3          | Fragmentación Fina              | 0.14            | 12%                                     |
|   |             | 4          | Fragmentación Fina (FG)         | 0.18            | 15%                                     |
|   |             | 5          | Fragmentación diferenciada      | 0.11            | 9%                                      |
|   |             | 6          | Fragmentación diferenciada (FG) | 0.15            | 13%                                     |

La Tabla 50 muestra los resultados para la comparación de las simulaciones con la extracción histórica del Panel III en términos de tonelajes extraídos. Es posible apreciar que, al igual que para las leyes de cobre, la simulación de fragmentación diferenciada posee el menor error relativo medio mensual, que corresponde al 4%.

TABLA 50: ERRORES EN TONELAJES EXTRAÍDOS PARA SIMULACIONES DE PANEL III

| <b>Tonelaje medio extraídos en datos mina (kt, mensual)</b> | <b>1076</b> | <b>SET</b> | <b>Nombre de la simulación</b>  | <b>RMSE (kt)</b> | <b>Error relativo medio mensual (%)</b> |
|---|-------------|------------|---------------------------------|------------------|---|
|   |             | 1          | Caso Base                       | 47               | 4%                                      |
|   |             | 2          | Flujo Granular                  | 48               | 4%                                      |
|   |             | 3          | Fragmentación Fina              | 76               | 7%                                      |
|   |             | 4          | Fragmentación Fina (FG)         | 39               | 4%                                      |
|   |             | 5          | Fragmentación diferenciada      | 46               | 4%                                      |
|   |             | 6          | Fragmentación diferenciada (FG) | 81               | 8%                                      |

La Tabla 51 resume los resultados de las simulaciones en términos de la entrada de dilución a nivel de plan de producción para el Cluster LHD. Es importante destacar que la simulación con fragmentación diferenciada y restricción de cave back presenta 34 meses de diferencia en la entrada de riolita. Esto se debe a que la riolita en los datos mina ingresa primero en el área sur de este cluster mezclada en el quebrado y que en el modelo de bloques de Andina no existe una medida de la riolita contenida en los bloques de quebrado. Por lo tanto, para este cluster, la entrada de quebrado puede tomarse como un estimador de la entrada de riolita.

TABLA 51: ERRORES EN DILUCIÓN EXTRAÍDA PARA SIMULACIONES DE CLUSTER LHD

| Set   | Nombre de la simulación         | RMSE (kt) |          | Diferencia de períodos en entrada de dilución (meses) |          |
|---|---------------------------------|-----------|----------|---|----------|
|   |                                 | Riolita   | Quebrado | Riolita   | Quebrado |
| 1   | Caso Base                       | 21        | 13       | -   | 6        |
| 2   | Flujo Granular                  | 21        | 21       | -   | 22       |
| 3   | Fragmentación Fina              | 11        | 40       | 27  | 17       |
| 4   | Fragmentación Fina (FG)         | 34        | 38       | -6  | 1        |
| 5   | Fragmentación diferenciada      | 21        | 15       | 34  | 6        |
| 6   | Fragmentación diferenciada (FG) | 10        | 50       | 23  | 7        |
| <b>Promedio de toneladas extraídas en datos mina CL (kt, mensual)</b> |                                 | 10        | 10       |   |          |

La Tabla 52 resume los resultados de las simulaciones en términos de la entrada de dilución a nivel de plan de producción para el Cluster Parrillas. Las simulaciones que mejor reproducen la entrada de dilución, tanto para riolita como para quebrado son aquellas con fragmentación diferenciada.

TABLA 52: ERRORES EN DILUCIÓN EXTRAÍDA PARA SIMULACIONES DE CLUSTER PARRILLAS

| Set   | Nombre de la simulación         | RMSE (kt) |          | Diferencia de períodos en entrada de dilución (meses) |          |
|---|---------------------------------|-----------|----------|---|----------|
|   |                                 | Riolita   | Quebrado | Riolita   | Quebrado |
| 1   | Caso Base                       | 16        | 29       | 15  | -3       |
| 2   | Flujo Granular                  | 16        | 29       | 26  | 38       |
| 3   | Fragmentación Fina              | 12        | 28       | -2  | -3       |
| 4   | Fragmentación Fina (FG)         | 28        | 28       | -3  | -3       |
| 5   | Fragmentación diferenciada      | 15        | 28       | -1  | -3       |
| 6   | Fragmentación diferenciada (FG) | 9         | 28       | 0   | -2       |
| <b>Promedio de toneladas extraídas en datos mina CP (kt, mensual)</b> |                                 | 13        | 25       |   |          |

La Figura 147 muestra los tonelajes y leyes de Cu extraídos del Panel III de Andina desde su inicio en diciembre de 1995 hasta enero de 2012.

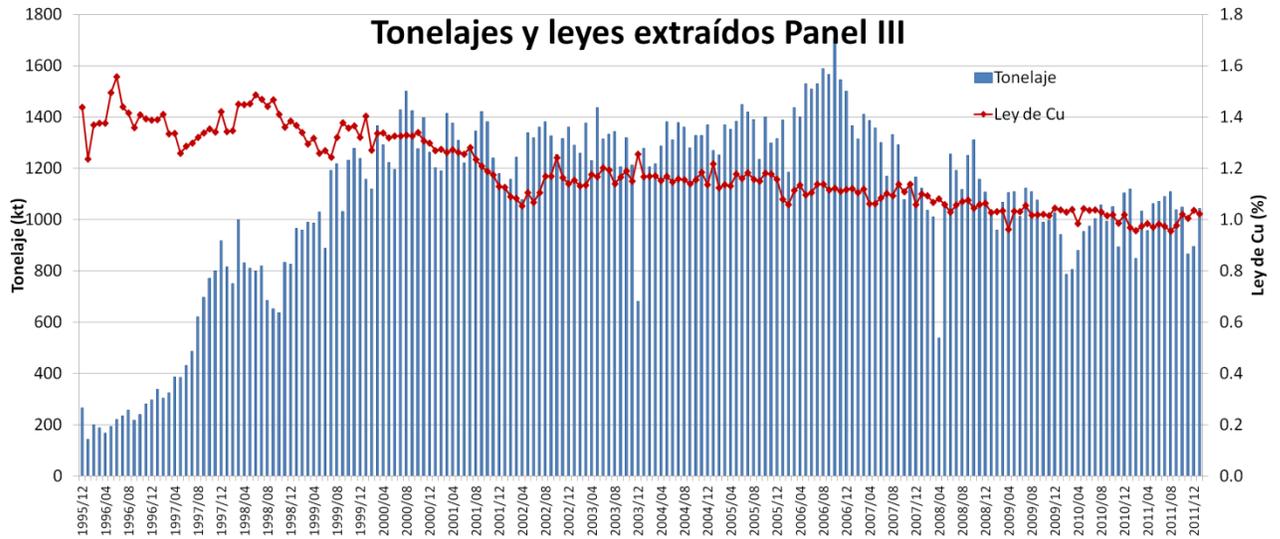


FIGURA 147: TONELAJES Y LEYES DE CU EXTRAÍDOS PANEL III ANDINA

Las figuras a continuación muestran las leyes de cobre y tonelajes extraídos y simulados en REBOP para el Panel III de Andina.

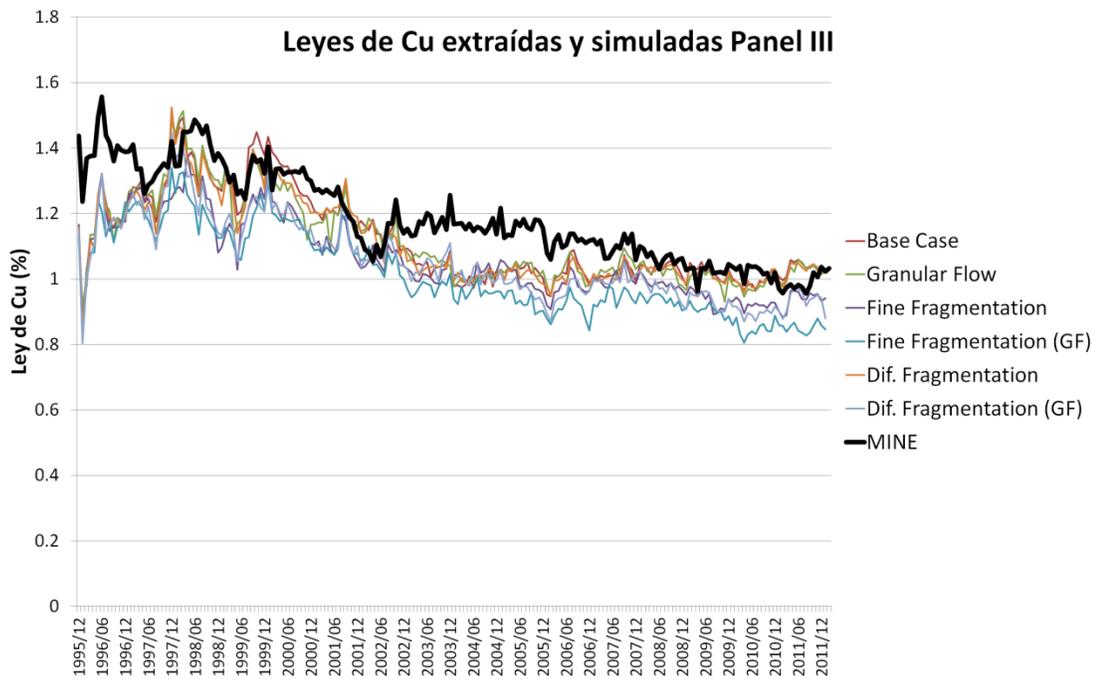


FIGURA 148: LEYES DE CU EXTRAÍDAS Y SIMULADAS PANEL III

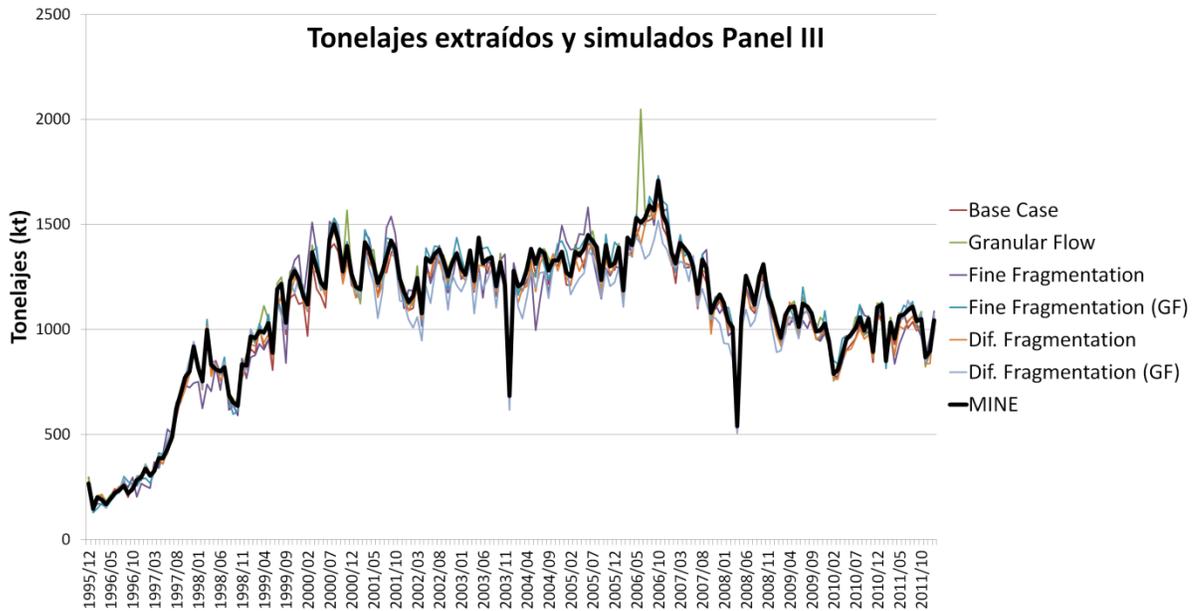


FIGURA 149: TONELAJES EXTRAÍDOS Y SIMULADOS PANEL III

Las figuras a continuación muestran el contenido de riolita y quebrado extraído y simulado en REBOP para el Cluster LHD.

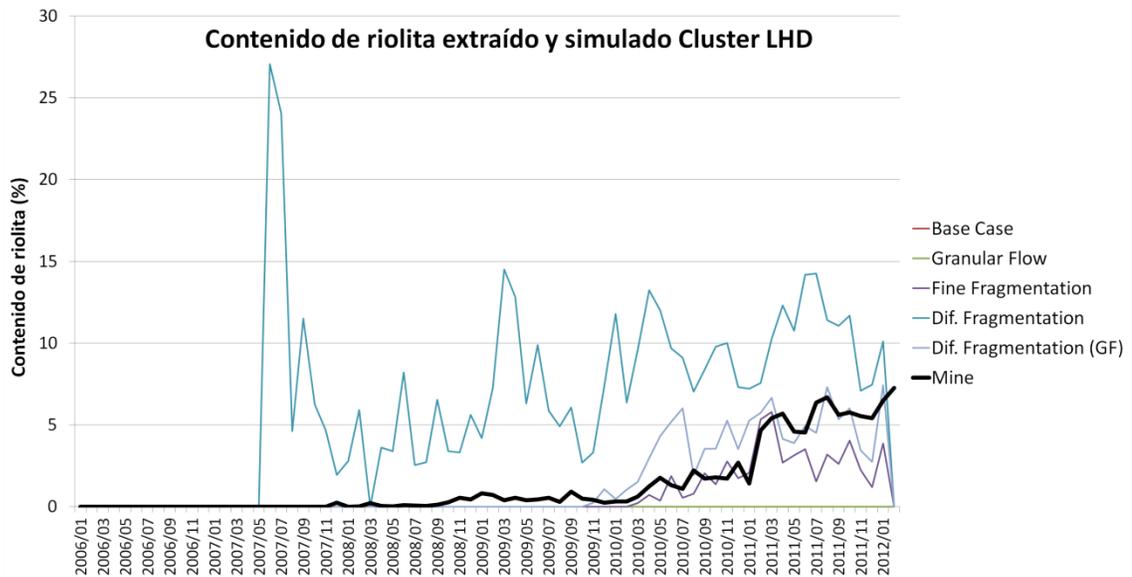


FIGURA 150: CONTENIDO DE RIOLITA SIMULADO Y EXTRAÍDO CLUSTER LHD

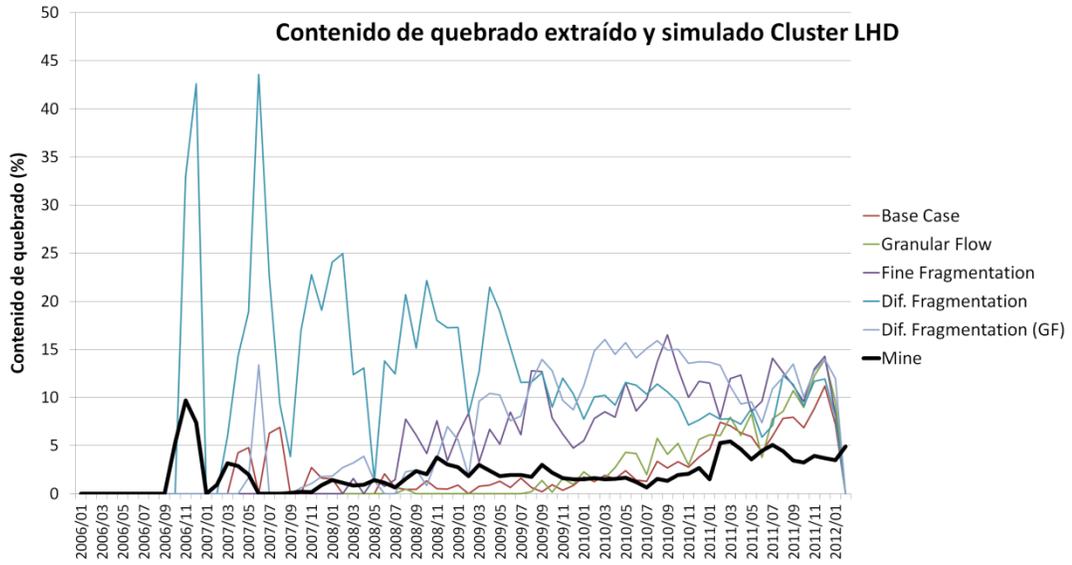


FIGURA 151: CONTENIDO DE QUEBRADO EXTRAÍDO Y SIMULADO CLUSTER LHD

Las figuras a continuación muestran el contenido de riolita y quebrado extraído y simulado en REBOP para el Cluster Parrillas.

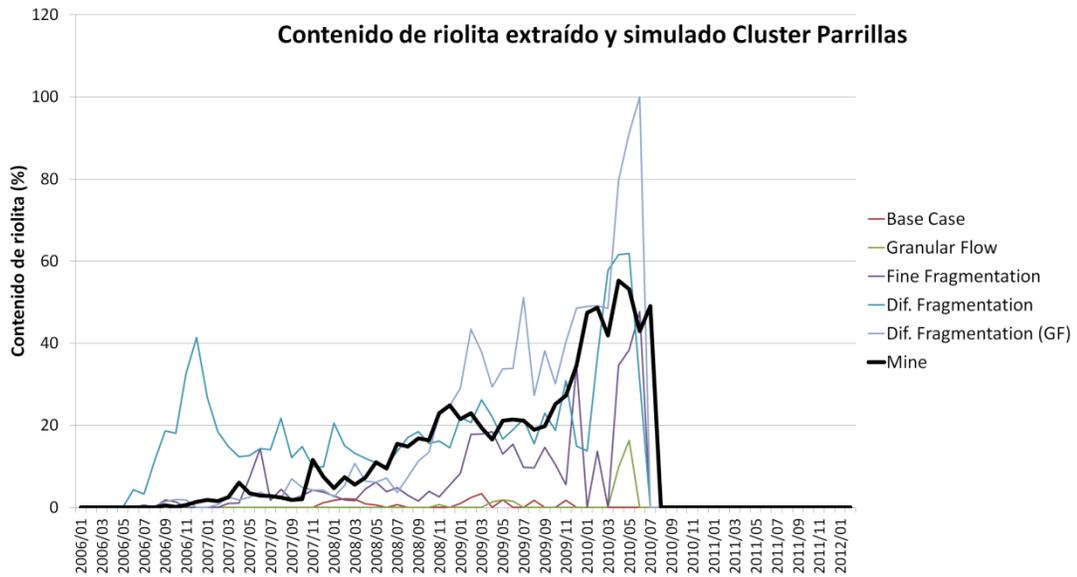


FIGURA 152: CONTENIDO DE RIOLITA EXTRAÍDO Y SIMULADO CLUSTER LHD

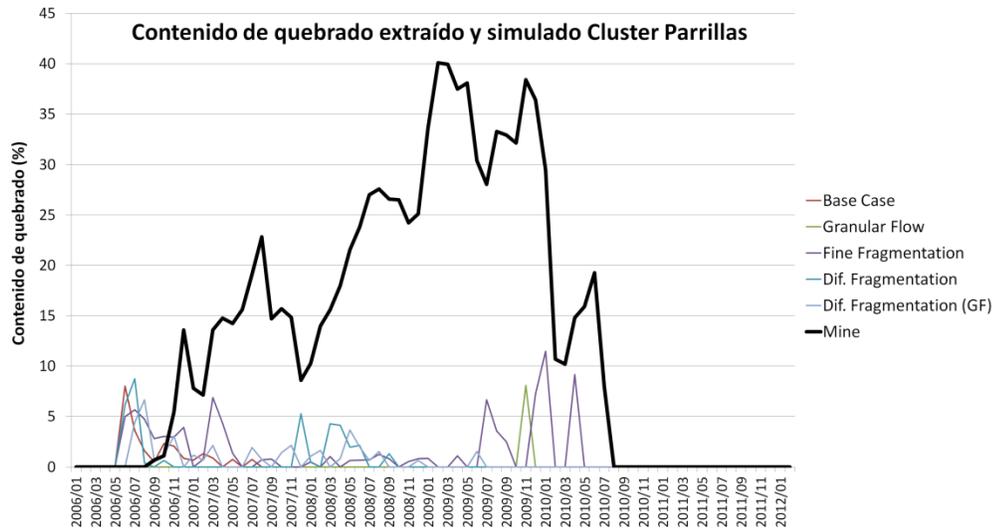


FIGURA 153: CONTENIDO DE QUEBRADO EXTRAÍDO Y SIMULADO CLUSTER PARRILLAS

La Figura 154 ilustra el PEQ(3%) para los datos mina y las simulaciones de los clusteres de dilución del Panel III de Andina.

La Figura 155 ilustra el PER(3%) para los datos mina y las simulaciones de los clusteres de dilución del Panel III de Andina.

La Tabla 53 muestra los errores de los puntos de entrada de riolita y quebrado a nivel de puntos de extracción simulados en REBOP para los clusteres de dilución de Andina separados en las áreas definidas en el Capítulo 5 (Figura 95).

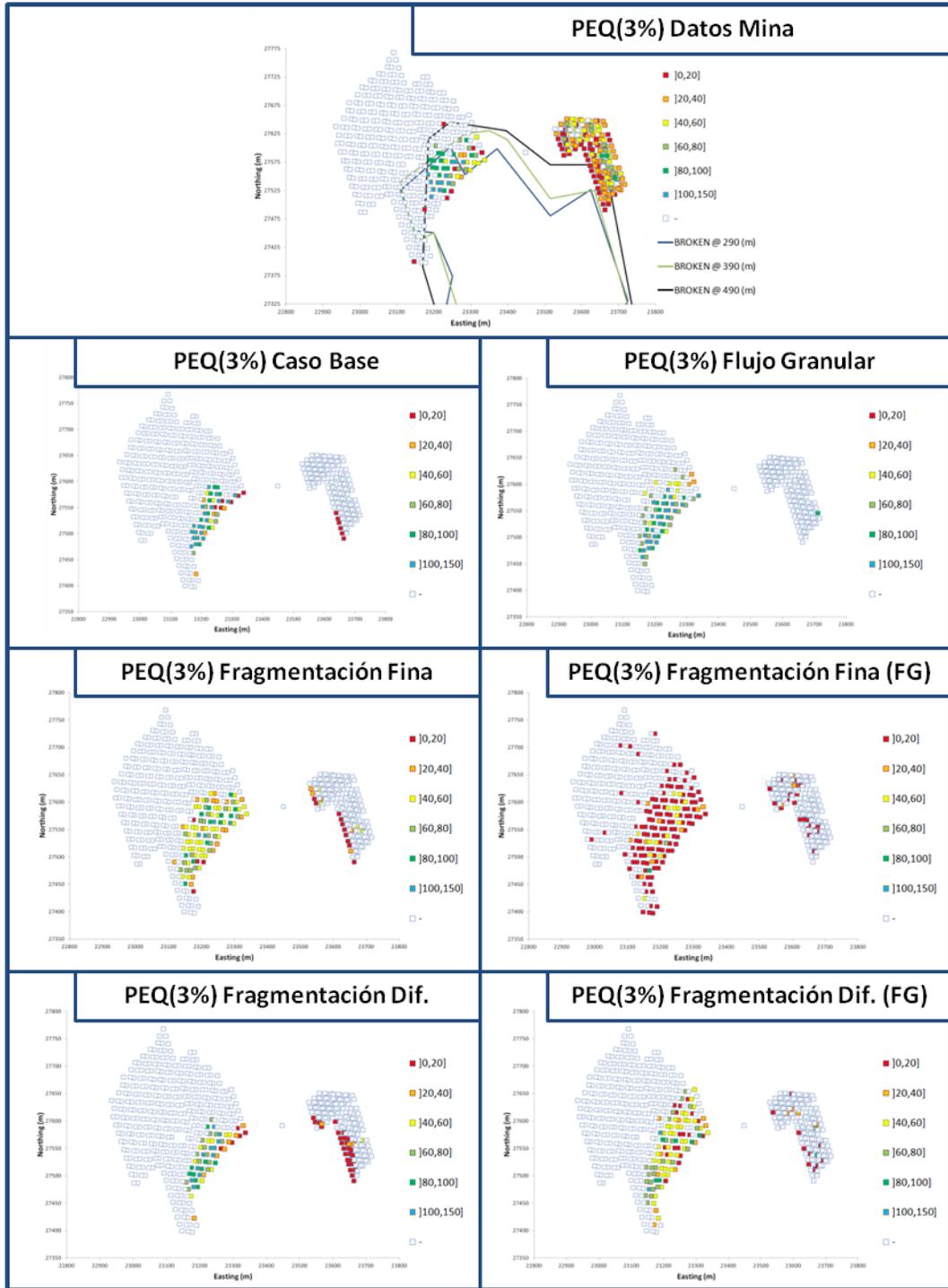


FIGURA 154: VISTAS EN PLANTA PEQ(3%) DATOS MINA Y SIMULACIONES CLUSTERS DE DILUCCION PANEL III

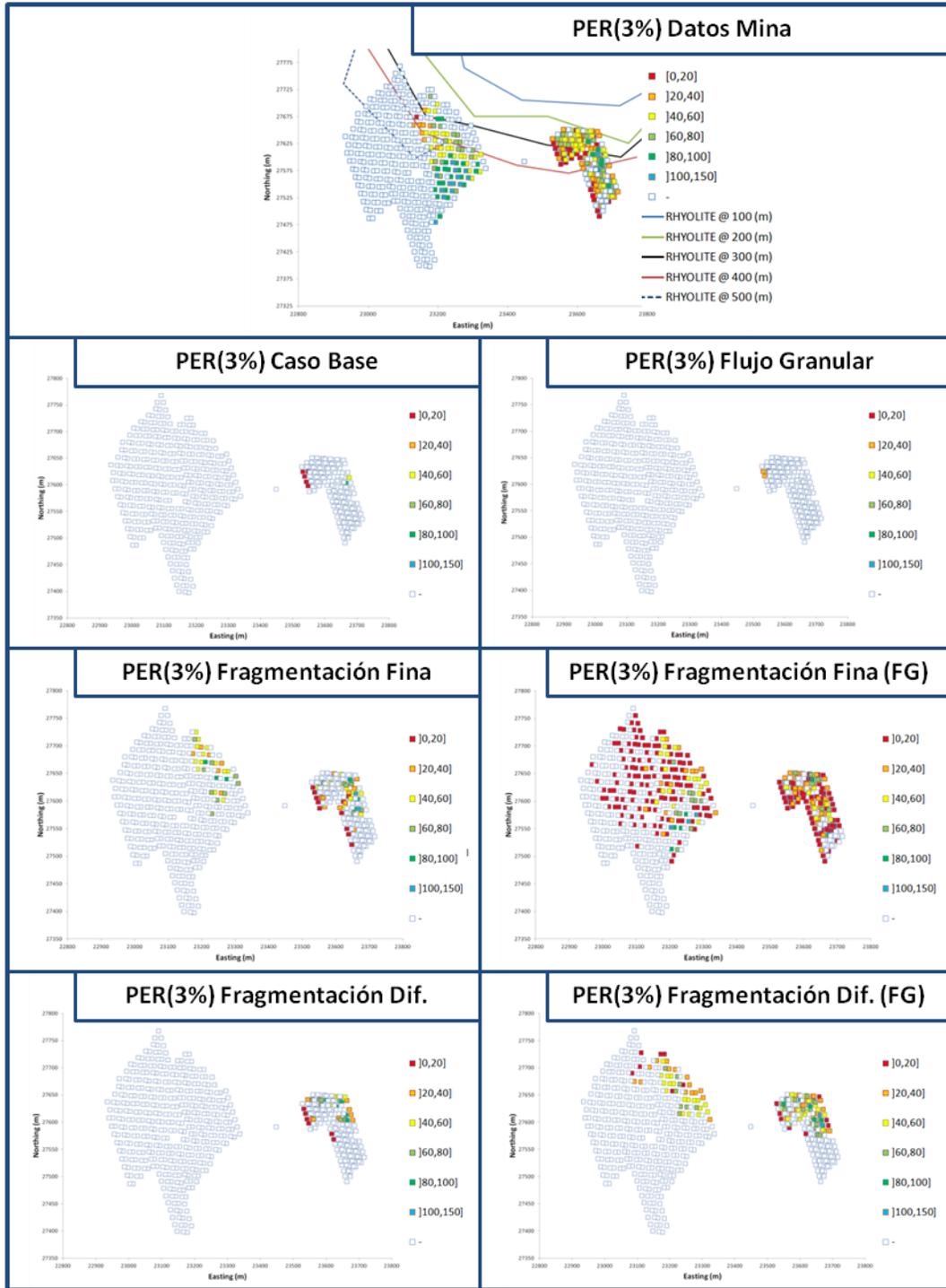


FIGURA 155: VISTAS EN PLANTA PER(3%) DATOS MINA Y SIMULACIONES CLUSTERES DE DILUCCION PANEL III

TABLA 53: CONFIABILIDAD, ERROR CUADRÁTICO MEDIO Y MEDIA DE PER(3%) Y PEQ(3%) PARA SIMULACIONES DE CLUSTER LHD (CL) Y CLUSTER PARRILLAS (CP) POR ÁREAS

| Set 1 - Caso Base               |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|---------------------------------|------------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|---------|
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 50                | 0        | -       | 50                | 0        | -       |
|                                 | Área Sur   | 49                | 0        | -       | 72                | 52       | 83±[43] |
| CP                              | Área Norte | 50                | 19       | 26±[35] | 50                | 0        | -       |
|                                 | Área Sur   | 43                | 0        | -       | 57                | 7        | 7±[2]   |
| Set 2 - Flujo Granular          |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 49                | 0        | 55±[13] | 50                | 0        | -       |
|                                 | Área Sur   | 46                | 74       | 90±[30] | 49                | 0        | -       |
| CP                              | Área Norte | 46                | 0        | -       | 52                | 29       | 41±[17] |
|                                 | Área Sur   | 39                | 0        | 82±[5]  | 50                | 0        | -       |
| Set 3 - Fragmentación Fina      |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 50                | 30       | 54±[17] | 82                | 14       | 50±[12] |
|                                 | Área Sur   | 44                | 0        | 65±[16] | 72                | 37       | 58±[24] |
| CP                              | Área Norte | 55                | 26       | 49±[32] | 55                | 18       | 21±[14] |
|                                 | Área Sur   | 45                | 6        | 15±[13] | 61                | 13       | 21±[18] |
| Set 4 - Fragmentación Fina (FG) |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 39                | 68       | 15±[12] | 93                | 54       | 9±[12]  |
|                                 | Área Sur   | 27                | 60       | 41±[16] | 65                | 69       | 15±[16] |
| CP                              | Área Norte | 54                | 30       | 27±[7]  | 59                | 20       | 16±[7]  |
|                                 | Área Sur   | 55                | 33       | 18±[1]  | 56                | 37       | 5±[1]   |
| Set 5 - Fragmentación Dif.      |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 50                | 0        | -       | 50                | 0        | 68±[6]  |
|                                 | Área Sur   | 49                | 0        | -       | 74                | 44       | 69±[34] |
| CP                              | Área Norte | 46                | 24       | 47±[30] | 57                | 11       | 13±[6]  |
|                                 | Área Sur   | 43                | 0        | -       | 70                | 9        | 13±[11] |
| Set 6 - Fragmentación Dif. (FG) |            | PER(3%)           |          |         | PEQ(3%)           |          |         |
|                                 |            | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   | Confiabilidad (%) | RMSE (%) | Media   |
| CL                              | Área Norte | 51                | 41       | 40±[17] | 64                | 29       | 45±[23] |
|                                 | Área Sur   | 47                | 88       | 39±[3]  | 74                | 55       | 50±[23] |
| CP                              | Área Norte | 52                | 23       | 51±[26] | 54                | 23       | 24±[21] |
|                                 | Área Sur   | 43                | 0        | -       | 59                | 27       | 20±[30] |

# ANEXO C.

## RESULTADOS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS DE MECANISMO DE ENTRADA DE DILUCIÓN LATERAL

En esta sección se muestran en detalle los resultados más relevantes de las pruebas realizadas sobre la hipótesis de mecanismo de entrada de dilución lateral.

### C.1 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE DE AIR GAP

La Tabla 54 muestra los resultados del factor de seguridad en función del ángulo de falla y la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 5 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 54: FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE FALLA Y ALTURA DE AIR GAP PARA ALTURA DE SOBRECARGA DE 5 (M) CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA

| FS<br>(Altura de sobrecarga = 5 (m)) |     | Ángulo Falla (°) |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                      |     | 25               | 35  | 45  | 55  | 65  | 75  | 85  |
| Altura de air gap (m)                | 0.1 | 1.7              | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|                                      | 0.5 | 1.7              | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|                                      | 1   | 1.7              | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|                                      | 10  | 1.5              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |

La Tabla 55 muestra los resultados del factor de seguridad en función del ángulo de falla y la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 10 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 55: FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE FALLA Y ALTURA DE AIR GAP PARA ALTURA DE SOBRECARGA DE 10 (M) CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA

| FS<br>(Altura de sobrecarga = 10 (m)) |     | Ángulo Falla (°) |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                       |     | 25               | 35  | 45  | 55  | 65  | 75  | 85  |
| Altura de air gap (m)                 | 0.1 | 1.5              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 0.5 | 1.5              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 1   | 1.5              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 10  | 1.5              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |

La Tabla 56 muestra los resultados del factor de seguridad en función del ángulo de falla y la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 50 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 56: FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE FALLA Y ALTURA DE AIR GAP PARA ALTURA DE SOBRECARGA DE 50 (M) CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA

| FS<br>(Altura de sobrecarga = 50 (m)) |     | Ángulo Falla (°) |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                       |     | 25               | 35  | 45  | 55  | 65  | 75  | 85  |
| Altura de air gap (m)                 | 0.1 | 1.4              | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 0.5 | 1.4              | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 1   | 1.4              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|                                       | 10  | 1.4              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

La Tabla 57 muestra los resultados del factor de seguridad en función del ángulo de falla y la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 100 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 57: FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE FALLA Y ALTURA DE AIR GAP PARA ALTURA DE SOBRECARGA DE 100 (M) CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA

| FS<br>(Altura de sobrecarga = 100 (m)) |     | Ángulo Falla (°) |     |     |     |     |     |     |
|--|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  |     | 25               | 35  | 45  | 55  | 65  | 75  | 85  |
| Altura de air gap (m)                  | 0.1 | 1.4              | 0.9 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|  | 0.5 | 1.4              | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|  | 1   | 1.4              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
|  | 10  | 1.4              | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

La Tabla 58 muestra los resultados de la masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 5 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 58: MASA DE LA CUÑA MOVILIZADA PARA EL ÁNGULO DE FALLA QUE MINIMIZA EL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE AIR GAP CON LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA PARA UNA ALTURA DE SOBRECARGA DE 5 (M)

| Altura de air gap (m) | $\alpha$ mínFS | FS mín | Masa Cuña (t/m) |
|-----------------------|----------------|--------|-----------------|
| 1                     | 68.4           | 0.4    | 0.6             |
| 2                     | 69.1           | 0.4    | 2.4             |
| 3                     | 69.8           | 0.3    | 5.3             |
| 4                     | 70.4           | 0.3    | 9.1             |
| 5                     | 70.9           | 0.3    | 13.9            |
| 6                     | 71.4           | 0.3    | 19.4            |
| 7                     | 71.9           | 0.3    | 25.6            |
| 8                     | 72.3           | 0.3    | 32.7            |
| 9                     | 72.7           | 0.3    | 40.4            |
| 10                    | 73.1           | 0.3    | 48.6            |

La Tabla 59 muestra los resultados de la masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 10 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 59: MASA DE LA CUÑA MOVILIZADA PARA EL ÁNGULO DE FALLA QUE MINIMIZA EL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE AIR GAP CON LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA PARA UNA ALTURA DE SOBRECARGA DE 10 (M)

| Altura de air gap (m) | $\alpha$ mínFS | FS mín | Masa Cuña (t/m) |
|-----------------------|----------------|--------|-----------------|
| 1                     | 73.4           | 0.3    | 0.5             |
| 2                     | 73.8           | 0.3    | 1.9             |
| 3                     | 74.1           | 0.2    | 4.1             |
| 4                     | 74.4           | 0.2    | 7.1             |
| 5                     | 74.6           | 0.2    | 11.0            |
| 6                     | 74.9           | 0.2    | 15.5            |
| 7                     | 75.2           | 0.2    | 20.7            |
| 8                     | 75.4           | 0.2    | 26.7            |
| 9                     | 75.6           | 0.2    | 33.3            |
| 10                    | 75.8           | 0.2    | 40.5            |

La Tabla 60 muestra los resultados de la masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 50 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 60: MASA DE LA CUÑA MOVILIZADA PARA EL ÁNGULO DE FALLA QUE MINIMIZA EL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE AIR GAP CON LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA PARA UNA ALTURA DE SOBRECARGA DE 50 (M)

| Altura de air gap (m) | $\alpha$ mínFS | FS mín | Masa Cuña (t/m) |
|-----------------------|----------------|--------|-----------------|
| 1                     | 82.0           | 0.1    | 0.2             |
| 2                     | 82.0           | 0.1    | 0.9             |
| 3                     | 82.1           | 0.1    | 2.0             |
| 4                     | 82.1           | 0.1    | 3.6             |
| 5                     | 82.1           | 0.1    | 5.6             |
| 6                     | 82.2           | 0.1    | 7.9             |
| 7                     | 82.2           | 0.1    | 10.7            |
| 8                     | 82.2           | 0.1    | 14.0            |
| 9                     | 82.3           | 0.1    | 17.5            |
| 10                    | 82.3           | 0.1    | 21.6            |

La Tabla 61 muestra los resultados de la masa de la cuña movilizada para el ángulo de falla que minimiza el factor de seguridad en función de la altura del air gap para una altura de sobrecarga de 100 (m) con los parámetros geotécnicos del material quebrado de Andina.

TABLA 61: MASA DE LA CUÑA MOVILIZADA PARA EL ÁNGULO DE FALLA QUE MINIMIZA EL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE AIR GAP CON LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE MATERIAL QUEBRADO DE ANDINA PARA UNA ALTURA DE SOBRECARGA DE 100 (M)

| Altura de air gap (m) | $\alpha$ mínFS | FS mín | Masa Cuña (t/m) |
|-----------------------|----------------|--------|-----------------|
| 1                     | 84.3           | 0.1    | 0.2             |
| 2                     | 84.3           | 0.1    | 0.6             |
| 3                     | 84.3           | 0.1    | 1.4             |
| 4                     | 84.3           | 0.1    | 2.6             |
| 5                     | 84.3           | 0.1    | 4.0             |
| 6                     | 84.3           | 0.1    | 5.7             |
| 7                     | 84.4           | 0.1    | 7.7             |
| 8                     | 84.4           | 0.1    | 10.0            |
| 9                     | 84.4           | 0.1    | 12.7            |
| 10                    | 84.4           | 0.1    | 15.7            |

## C.2 SIMULACIONES CON PROPAGACIÓN DE CAVE BACK DIFERENCIADA

La Tabla 62 y la Tabla 63 muestran los resultados del desplazamiento de marcadores de quebrado desde su posición antes de comenzar la extracción del Cluster Parrillas hasta su posición final en los puntos de extracción para la simulación 2.

TABLA 62: DESPLAZAMIENTO DE MARCADORES DE QUEBRADO EN SIMULACIÓN 2 (PARTE 1)

| ID    | X inicial | Y inicial | Altura (m) | Punto Salida | X final | Y final | Despl. este (m) | Despl. norte (m) | Despl. horizontal (m) |
|-------|-----------|-----------|------------|--------------|---------|---------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 86136 | 23674     | 27481     | 218        | A123W32      | 23674   | 27509   | 0               | 28               | 28                    |
| 87805 | 23661     | 27481     | 210        | A125W34      | 23663   | 27491   | 2               | 10               | 10                    |
| 84214 | 23651     | 27481     | 173        | A125W34      | 23663   | 27491   | 12              | 10               | 16                    |
| 89637 | 23648     | 27544     | 43         | A116E34      | 23653   | 27540   | 5               | 4                | 6                     |
| 90464 | 23648     | 27544     | 51         | A116E34      | 23653   | 27540   | 5               | 4                | 6                     |
| 86157 | 23639     | 27473     | 295        | A122E30      | 23700   | 27528   | 61              | 55               | 82                    |
| 36651 | 23639     | 27496     | 288        | A122W34      | 23653   | 27511   | 14              | 15               | 21                    |
| 87051 | 23634     | 27519     | 160        | A120W34      | 23648   | 27521   | 14              | 2                | 15                    |
| 89750 | 23632     | 27560     | 27         | A112W34      | 23627   | 27560   | 5               | 0                | 5                     |
| 89752 | 23632     | 27560     | 35         | A112W34      | 23627   | 27560   | 5               | 0                | 5                     |
| 89760 | 23632     | 27568     | 35         | A111E34      | 23637   | 27569   | 5               | 1                | 5                     |
| 89630 | 23632     | 27584     | 51         | A111W34      | 23623   | 27569   | 9               | 15               | 17                    |
| 90794 | 23632     | 27568     | 43         | A112W34      | 23627   | 27560   | 5               | 8                | 9                     |
| 90471 | 23632     | 27568     | 51         | A112W34      | 23627   | 27560   | 5               | 8                | 9                     |
| 90461 | 23631     | 27520     | 286        | A120W34      | 23648   | 27521   | 17              | 1                | 17                    |
| 91456 | 23631     | 27520     | 307        | A118W34      | 23644   | 27529   | 13              | 9                | 16                    |
| 89819 | 23630     | 27536     | 200        | A114W34      | 23633   | 27550   | 3               | 14               | 14                    |
| 89804 | 23625     | 27514     | 285        | A120W34      | 23648   | 27521   | 23              | 7                | 24                    |
| 34559 | 23624     | 27522     | 294        | A118W34      | 23644   | 27529   | 20              | 7                | 21                    |
| 88179 | 23624     | 27521     | 311        | A118W34      | 23644   | 27529   | 20              | 8                | 21                    |
| 88303 | 23623     | 27530     | 181        | A116W34      | 23638   | 27540   | 15              | 10               | 17                    |
| 89805 | 23623     | 27538     | 221        | A114W34      | 23633   | 27550   | 10              | 12               | 16                    |
| 86644 | 23620     | 27537     | 126        | A118W34      | 23644   | 27529   | 24              | 8                | 25                    |
| 89631 | 23618     | 27581     | 272        | A109E34      | 23633   | 27579   | 15              | 2                | 15                    |
| 87552 | 23617     | 27504     | 327        | A120W34      | 23648   | 27521   | 31              | 17               | 35                    |
| 86930 | 23617     | 27496     | 336        | A118W32      | 23659   | 27538   | 42              | 42               | 59                    |
| 84640 | 23617     | 27472     | 328        | A123W28      | 23706   | 27526   | 89              | 54               | 104                   |
| 72294 | 23617     | 27529     | 331        | A116W34      | 23638   | 27540   | 21              | 11               | 24                    |

TABLA 63: DESPLAZAMIENTO DE MARCADORES DE QUEBRADO EN SIMULACIÓN 2 (PARTE 2)

| ID     | X inicial | Y inicial | Altura (m) | Punto Salida | X final | Y final | Despl. este (m) | Despl. norte (m) | Despl. horizontal (m) |
|--------|-----------|-----------|------------|--------------|---------|---------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 90457  | 23616     | 27584     | 285        | A107W34      | 23612   | 27588   | 4               | 4                | 6                     |
| 89764  | 23616     | 27570     | 69         | A111W34      | 23623   | 27569   | 7               | 1                | 7                     |
| 82645  | 23614     | 27551     | 345        | A118W34      | 23644   | 27529   | 30              | 22               | 37                    |
| 90798  | 23614     | 27567     | 349        | A109E34      | 23633   | 27579   | 19              | 12               | 22                    |
| 90477  | 23614     | 27567     | 364        | A114W34      | 23633   | 27550   | 19              | 17               | 26                    |
| 89870  | 23614     | 27567     | 353        | A112W34      | 23627   | 27560   | 13              | 7                | 15                    |
| 88471  | 23614     | 27559     | 244        | A111W34      | 23623   | 27569   | 9               | 10               | 14                    |
| 90475  | 23614     | 27559     | 346        | A107W30      | 23644   | 27605   | 30              | 46               | 55                    |
| 88147  | 23613     | 27580     | 162        | A109W34      | 23617   | 27579   | 4               | 1                | 4                     |
| 89979  | 23613     | 27567     | 334        | A105E34      | 23623   | 27599   | 10              | 32               | 33                    |
| 89958  | 23609     | 27544     | 334        | A120W34      | 23648   | 27521   | 39              | 23               | 45                    |
| 89968  | 23608     | 27544     | 326        | A120W34      | 23648   | 27521   | 40              | 23               | 46                    |
| 91458  | 23607     | 27560     | 353        | A111E34      | 23637   | 27569   | 30              | 9                | 32                    |
| 88931  | 23606     | 27552     | 318        | A112E32      | 23658   | 27568   | 52              | 16               | 54                    |
| 88193  | 23605     | 27566     | 326        | A105E32      | 23639   | 27608   | 34              | 42               | 54                    |
| 91451  | 23605     | 27542     | 363        | A107E30      | 23659   | 27605   | 54              | 63               | 83                    |
| 87070  | 23600     | 27545     | 333        | A107E30      | 23659   | 27605   | 59              | 60               | 84                    |
| 88188  | 23600     | 27567     | 328        | A105E28      | 23671   | 27624   | 71              | 57               | 91                    |
| 88191  | 23600     | 27559     | 327        | A105W30      | 23639   | 27616   | 39              | 57               | 69                    |
| 88520  | 23599     | 27559     | 311        | A107W30      | 23644   | 27605   | 45              | 46               | 64                    |
| 88526  | 23598     | 27566     | 316        | A105E30      | 23653   | 27616   | 55              | 50               | 74                    |
| 90459  | 23594     | 27552     | 379        | A122W34      | 23653   | 27511   | 59              | 41               | 72                    |
| 89960  | 23593     | 27545     | 362        | A107E30      | 23659   | 27605   | 66              | 61               | 89                    |
| 91455  | 23593     | 27575     | 378        | A109W34      | 23617   | 27579   | 24              | 4                | 24                    |
| 89822  | 23593     | 27566     | 332        | A105E32      | 23639   | 27608   | 46              | 42               | 62                    |
| 90472  | 23593     | 27560     | 366        | A109W34      | 23617   | 27579   | 24              | 19               | 30                    |
| 89956  | 23593     | 27553     | 360        | A116E30      | 23685   | 27556   | 92              | 3                | 93                    |
| 89970  | 23592     | 27560     | 333        | A107E30      | 23659   | 27605   | 67              | 45               | 81                    |
| 37999  | 23586     | 27553     | 358        | A107W30      | 23644   | 27605   | 58              | 52               | 78                    |
| 29067  | 23585     | 27560     | 418        | A114W34      | 23633   | 27550   | 48              | 10               | 49                    |
| 90474  | 23585     | 27545     | 407        | A118E28      | 23706   | 27555   | 121             | 10               | 122                   |
| 38098  | 23584     | 27488     | 375        | A122E28      | 23716   | 27536   | 132             | 48               | 141                   |
| 37193  | 23584     | 27480     | 362        | A122W28      | 23701   | 27536   | 117             | 56               | 130                   |
| 34555  | 23575     | 27505     | 366        | A112E28      | 23691   | 27584   | 116             | 79               | 140                   |
| 22286  | 23568     | 27520     | 400        | A118E28      | 23706   | 27555   | 138             | 35               | 143                   |
| 36013  | 23559     | 27497     | 381        | A118W28      | 23691   | 27555   | 132             | 58               | 144                   |
| 65691  | 23537     | 27541     | 410        | A109W30      | 23650   | 27596   | 113             | 55               | 126                   |
| 110485 | 23528     | 27608     | 515        | A095E40      | 23548   | 27625   | 20              | 17               | 26                    |
| 110486 | 23520     | 27608     | 515        | A097W40      | 23537   | 27616   | 17              | 8                | 19                    |

La Tabla 64 y la Tabla 65 muestran los resultados del desplazamiento de marcadores de quebrado desde su posición antes de comenzar la extracción del Cluster Parrillas hasta su posición final en los puntos de extracción para la simulación 3.

TABLA 64: DESPLAZAMIENTO DE MARCADORES DE QUEBRADO EN SIMULACIÓN 3 (PARTE 1)

| ID     | X inicial | Y inicial | Altura (m) | Punto Salida | X final | Y final | Despl. este (m) | Despl. norte (m) | Despl. horizontal (m) |
|--------|-----------|-----------|------------|--------------|---------|---------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 98475  | 23674     | 27492     | 218        | A125W34      | 23663   | 27491   | 11              | 1                | 11                    |
| 88931  | 23654     | 27515     | 294        | A122W34      | 23653   | 27511   | 1               | 4                | 4                     |
| 87193  | 23653     | 27538     | 221        | A120E32      | 23679   | 27529   | 26              | 9                | 28                    |
| 28067  | 23651     | 27481     | 173        | A116W34      | 23638   | 27540   | 13              | 59               | 61                    |
| 84968  | 23650     | 27563     | 333        | A118E34      | 23658   | 27529   | 8               | 34               | 34                    |
| 83958  | 23649     | 27496     | 288        | A123E34      | 23673   | 27501   | 24              | 5                | 24                    |
| 84645  | 23648     | 27544     | 43         | A111W34      | 23623   | 27569   | 25              | 25               | 35                    |
| 88979  | 23645     | 27545     | 268        | A122E34      | 23668   | 27511   | 23              | 34               | 41                    |
| 93458  | 23642     | 27560     | 463        | A118W32      | 23659   | 27538   | 17              | 22               | 28                    |
| 98472  | 23640     | 27566     | 332        | A114E34      | 23648   | 27550   | 8               | 16               | 18                    |
| 116485 | 23634     | 27580     | 120        | A123W34      | 23658   | 27501   | 24              | 79               | 83                    |
| 99477  | 23634     | 27519     | 160        | A112W34      | 23627   | 27560   | 7               | 41               | 42                    |
| 98455  | 23634     | 27509     | 346        | A122W32      | 23669   | 27519   | 35              | 10               | 37                    |
| 99798  | 23632     | 27568     | 463        | A123W32      | 23674   | 27509   | 42              | 59               | 72                    |
| 115486 | 23632     | 27560     | 135        | A123W34      | 23658   | 27501   | 26              | 59               | 64                    |
| 86870  | 23632     | 27564     | 51         | A114W34      | 23633   | 27550   | 1               | 14               | 14                    |
| 89471  | 23632     | 27568     | 151        | A118W34      | 23644   | 27529   | 12              | 39               | 41                    |
| 83764  | 23632     | 27481     | 352        | A114W32      | 23649   | 27558   | 17              | 77               | 79                    |
| 98457  | 23631     | 27567     | 314        | A120W32      | 23664   | 27529   | 33              | 38               | 50                    |
| 89147  | 23631     | 27520     | 286        | A114W32      | 23649   | 27558   | 18              | 38               | 42                    |
| 84640  | 23631     | 27542     | 462        | A112E28      | 23691   | 27584   | 60              | 42               | 73                    |
| 83157  | 23631     | 27558     | 447        | A105E30      | 23653   | 27616   | 22              | 58               | 62                    |
| 86930  | 23630     | 27536     | 200        | A120E34      | 23662   | 27521   | 32              | 15               | 36                    |
| 87552  | 23628     | 27568     | 463        | A116E34      | 23653   | 27540   | 25              | 28               | 38                    |
| 88136  | 23628     | 27560     | 463        | A105E28      | 23671   | 27624   | 43              | 64               | 77                    |
| 88644  | 23628     | 27579     | 301        | A116W30      | 23670   | 27556   | 42              | 23               | 48                    |
| 85804  | 23627     | 27573     | 328        | A111W32      | 23639   | 27577   | 12              | 4                | 13                    |
| 79294  | 23624     | 27521     | 311        | A122E34      | 23668   | 27511   | 44              | 10               | 45                    |
| 86179  | 23624     | 27555     | 462        | A116E32      | 23669   | 27548   | 45              | 7                | 46                    |
| 36559  | 23623     | 27530     | 181        | A120W32      | 23664   | 27529   | 41              | 1                | 41                    |
| 38651  | 23620     | 27537     | 126        | A109E32      | 23649   | 27588   | 29              | 51               | 58                    |
| 87630  | 23620     | 27557     | 462        | A112W34      | 23627   | 27560   | 7               | 3                | 7                     |
| 89303  | 23620     | 27570     | 459        | A109W34      | 23617   | 27579   | 3               | 9                | 9                     |
| 97461  | 23617     | 27544     | 327        | A111E34      | 23637   | 27569   | 20              | 25               | 32                    |
| 84214  | 23617     | 27503     | 515        | A120W34      | 23648   | 27521   | 31              | 18               | 36                    |
| 88805  | 23617     | 27529     | 331        | A118E34      | 23658   | 27529   | 41              | 0                | 41                    |
| 96456  | 23616     | 27584     | 285        | A105E30      | 23653   | 27616   | 37              | 32               | 49                    |
| 88631  | 23616     | 27570     | 69         | A105W30      | 23639   | 27616   | 23              | 46               | 51                    |
| 84051  | 23616     | 27533     | 300        | A118W34      | 23644   | 27529   | 28              | 4                | 28                    |
| 85819  | 23616     | 27555     | 333        | A111W34      | 23623   | 27569   | 7               | 14               | 15                    |
| 83805  | 23616     | 27568     | 81         | A112E32      | 23658   | 27568   | 42              | 0                | 42                    |
| 99471  | 23614     | 27551     | 345        | A116W32      | 23654   | 27548   | 40              | 3                | 40                    |
| 96794  | 23614     | 27567     | 349        | A114W30      | 23665   | 27566   | 51              | 1                | 51                    |
| 94464  | 23614     | 27567     | 353        | A122W30      | 23685   | 27528   | 71              | 39               | 81                    |
| 85637  | 23614     | 27559     | 244        | A114E32      | 23664   | 27558   | 50              | 1                | 50                    |

TABLA 65: DESPLAZAMIENTO DE MARCADORES DE QUEBRADO EN SIMULACIÓN 3 (PARTE 2)

| ID    | X inicial | Y inicial | Altura (m) | Punto Salida | X final | Y final | Despl. este (m) | Despl. norte (m) | Despl. horizontal (m) |
|-------|-----------|-----------|------------|--------------|---------|---------|-----------------|------------------|-----------------------|
| 89760 | 23613     | 27580     | 162        | A112E32      | 23658   | 27568   | 45              | 12               | 47                    |
| 84752 | 23613     | 27567     | 334        | A111W30      | 23655   | 27586   | 42              | 19               | 46                    |
| 88750 | 23612     | 27568     | 379        | A111W34      | 23623   | 27569   | 11              | 1                | 11                    |
| 35013 | 23608     | 27544     | 326        | A118E32      | 23674   | 27538   | 66              | 6                | 67                    |
| 26286 | 23608     | 27527     | 418        | A112E34      | 23643   | 27560   | 35              | 33               | 48                    |
| 33098 | 23607     | 27560     | 353        | A111E30      | 23669   | 27586   | 62              | 26               | 68                    |
| 34555 | 23606     | 27552     | 318        | A116W30      | 23670   | 27556   | 64              | 4                | 64                    |
| 39193 | 23605     | 27566     | 326        | A105E30      | 23653   | 27616   | 48              | 50               | 69                    |
| 67691 | 23605     | 27542     | 363        | A105E30      | 23653   | 27616   | 48              | 74               | 89                    |
| 93474 | 23603     | 27575     | 326        | A105E30      | 23653   | 27616   | 50              | 41               | 65                    |
| 88956 | 23600     | 27568     | 328        | A112W32      | 23644   | 27568   | 44              | 0                | 44                    |
| 86188 | 23598     | 27566     | 316        | A112E34      | 23643   | 27560   | 45              | 6                | 45                    |
| 88960 | 23596     | 27562     | 177        | A112W32      | 23644   | 27568   | 48              | 6                | 48                    |
| 86070 | 23595     | 27512     | 443        | A123W32      | 23674   | 27509   | 79              | 3                | 79                    |
| 97451 | 23594     | 27561     | 353        | A111E30      | 23669   | 27586   | 75              | 25               | 80                    |
| 87970 | 23593     | 27545     | 362        | A114W34      | 23633   | 27550   | 40              | 6                | 40                    |
| 37999 | 23593     | 27575     | 378        | A105E28      | 23671   | 27624   | 78              | 49               | 92                    |
| 88526 | 23593     | 27553     | 360        | A122W34      | 23653   | 27511   | 60              | 42               | 74                    |
| 99459 | 23592     | 27560     | 333        | A105E30      | 23653   | 27616   | 61              | 56               | 83                    |
| 88191 | 23590     | 27560     | 244        | A116E32      | 23669   | 27548   | 79              | 12               | 80                    |
| 85520 | 23588     | 27551     | 333        | A111W30      | 23655   | 27586   | 67              | 35               | 75                    |
| 88822 | 23585     | 27606     | 418        | A097W40      | 23537   | 27616   | 48              | 10               | 49                    |
| 76598 | 23580     | 27540     | 306        | A118E32      | 23674   | 27538   | 94              | 2                | 94                    |
| 89510 | 23578     | 27538     | 126        | A109E32      | 23649   | 27588   | 71              | 50               | 87                    |
| 99577 | 23575     | 27505     | 366        | A120W34      | 23648   | 27521   | 73              | 16               | 75                    |
| 89684 | 23568     | 27520     | 400        | A111W30      | 23655   | 27586   | 87              | 66               | 110                   |
| 86304 | 23563     | 27548     | 375        | A112E28      | 23691   | 27584   | 128             | 36               | 133                   |
| 86291 | 23561     | 27521     | 183        | A116W34      | 23638   | 27540   | 77              | 19               | 79                    |
| 28693 | 23559     | 27497     | 381        | A122W32      | 23669   | 27519   | 110             | 22               | 112                   |
| 87983 | 23557     | 27606     | 362        | A105E28      | 23671   | 27624   | 114             | 18               | 115                   |
| 86814 | 23556     | 27544     | 334        | A112W28      | 23675   | 27584   | 119             | 40               | 126                   |
| 97692 | 23550     | 27564     | 515        | A112E28      | 23691   | 27584   | 141             | 20               | 142                   |
| 87135 | 23550     | 27546     | 462        | A101W40      | 23547   | 27598   | 3               | 52               | 53                    |
| 86945 | 23550     | 27612     | 336        | A097E40      | 23553   | 27616   | 3               | 4                | 5                     |
| 86360 | 23548     | 27608     | 285        | A095E40      | 23548   | 27625   | 0               | 17               | 17                    |
| 99277 | 23548     | 27632     | 515        | A093E40      | 23544   | 27634   | 4               | 2                | 4                     |
| 89371 | 23547     | 27613     | 150        | A105W28      | 23655   | 27623   | 108             | 10               | 108                   |
| 39932 | 23545     | 27612     | 327        | A099E40      | 23558   | 27607   | 13              | 5                | 14                    |
| 89558 | 23540     | 27560     | 112        | A101W40      | 23547   | 27598   | 7               | 38               | 39                    |
| 96871 | 23540     | 27630     | 35         | A093E40      | 23544   | 27634   | 4               | 4                | 6                     |
| 87335 | 23538     | 27600     | 45         | A099W40      | 23542   | 27606   | 4               | 6                | 7                     |
| 88778 | 23537     | 27541     | 410        | A112E32      | 23658   | 27568   | 121             | 27               | 124                   |
| 86894 | 23536     | 27606     | 35         | A099W40      | 23542   | 27606   | 6               | 0                | 6                     |
| 89804 | 23535     | 27620     | 210        | A093E40      | 23544   | 27634   | 9               | 14               | 17                    |
| 99346 | 23526     | 27606     | 272        | A097W40      | 23537   | 27616   | 11              | 10               | 15                    |