

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Propuesta de Implementación de un Modelo Matemático  
con Grado de Confiabilidad (RCM) en el método  
de explotación Shirinkage en la CIA.  
Minera Condestable S. A.**

Edmar Evorcio Gallardo Flores

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2020

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **ASESOR**

Ing. Faustino Aníbal Gutiérrez Dañobeitia

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por hacer posible que nunca me rindiera y siguiera a paso firme hasta lograr mis objetivos. A mis queridos padres Nilton y Fortunata por ser el motivo que me impulsa a seguir adelante e inculcar en mí el deseo de superación. A mis hermanos Cesar, Liz y a mi cuñado Hevert y a mi hermana Miriam que desde el cielo guía mi camino; por el tiempo y consejos que fueron de trascendencia en mi formación por parte de mi familia. Mi especial agradecimiento a mi profesor, Aníbal Gutiérrez Dañobeitia, por su paciencia, su valiosa asesoría y por motivarme a seguir trabajando ante cualquier obstáculo.

## **DEDICATORIA**

Con mucho amor a mi amada familia: mis papitos Nilton y Fortunata y hermanos, porque sin su importante apoyo no lo hubiera podido lograr. A la universidad Continental y a todos mis familiares que me apoyaron para crecer profesionalmente y también como persona.

## INDICE DE CONTENIDO

|   |        |
|---|--------|
| CARÁTULA.....   | I      |
| ASESOR.....   | II     |
| AGRADECIMIENTO .....  | III    |
| DEDICATORIA .....   | IV     |
| INDICE DE CONTENIDO .....                                     | V      |
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | VIII X |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | IX     |
| RESUMEN.....  | XIII   |
| ABSTRACT.....   | XIV    |
| INTRODUCCIÓN .....  | XV     |
| CAPÍTULO I EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....              | 18     |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                         | 18     |
| 1.2. Formulación del problema .....                           | 19     |
| 1.3. Objetivo de la tesis .....                               | 20     |
| CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....                                | 21     |
| 2.1. Antecedentes .....                                       | 21     |
| 2.2. Planificación minera .....                               | 27     |
| 2.3. Estado del problema .....                                | 29     |
| 2.4. Principio de la teoría de la confiabilidad .....         | 31     |
| 2.4.1. Confiabilidad de múltiples componentes .....           | 33     |
| 2.4.2. Confiabilidad aplicada a la planificación minera ..... | 34     |
| 2.4.3. Precedentes (modelo de confiabilidad) .....            | 34     |
| 2.4.4. Parámetros del modelo .....                            | 35     |
| 2.4.5. Curva de Producción Característica (PCC) .....         | 36     |
| 2.4.6. Resultados de la metodología.....                      | 39     |
| 2.4.7. Piques de traspaso .....                               | 40     |
| 2.4.8. Diseño de parrillas .....                              | 43     |
| 2.4.9. Interferencias operacionales .....                     | 43     |
| 2.4.10. Simulación .....                                      | 44     |

|   |     |
|---|-----|
| 2.4.11. Clasificación de modelos.....                         | 48  |
| 2.5. Descripción de la Cía. minera Condestable S. A. ....     | 50  |
| 2.5.1. Generalidades de la empresa.....                       | 50  |
| 2.5.2. Actividades económicas .....                           | 52  |
| 2.5.3. Mineralización .....                                   | 53  |
| 2.5.4. Ubicación y acceso.....                                | 56  |
| 2.6. Geología.....  | 57  |
| 2.6.1. Geomorfología.....                                     | 57  |
| 2.6.2. Unidades litológicas.....                              | 58  |
| 2.6.3. Condiciones estructurales .....                        | 62  |
| 2.6.4. Condiciones hidrogeológicas.....                       | 66  |
| 2.6.5. Geología del yacimiento .....                          | 67  |
| 2.7. Método del minado .....                                  | 67  |
| CAPÍTULO III MÉTODO .....                                     | 72  |
| 3.1. Antecedentes de la mina.....                             | 72  |
| 3.2. Infraestructura mina .....                               | 74  |
| 3.2.1. Nivel de producción.....                               | 74  |
| 3.2.2. Nivel y subniveles de transporte .....                 | 75  |
| 3.2.3. Análisis históricos de producción.....                 | 76  |
| 3.2.3. Producción mina .....                                  | 76  |
| 3.3.1. Análisis información. Piques de traspaso año 2016..... | 80  |
| 3.4.1. Sectorización por cruzada de transporte .....          | 85  |
| 3.4.2. Por tipo de eventos .....                              | 89  |
| 3.4.3. Colgaduras.....  | 90  |
| 3.5. Curvas U y curvas de producción característica .....     | 94  |
| 3.5.1. Piques de traspaso.....                                | 94  |
| 3.5.2. Metodología de las curvas de producción .....          | 95  |
| 3.5.3. Curvas U.....  | 96  |
| 3.5.4. Curvas PCC .....                                       | 99  |
| 3.6. Resultados y análisis .....                              | 100 |
| 3.6.1. Curvas U.....  | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.7. Incorporaciones curvas U y PCC en modelo de confiabilidad..... | 105 |
| 3.8. Población y muestra.....                                       | 109 |
| 3.8.1. Población .....  | 109 |
| 3.8.2. Muestra .....  | 109 |
| 3.9. Metodología aplicativa .....                                   | 110 |
| 3.9.1. Organización de la tesis .....                               | 111 |
| CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS .....                         | 113 |
| 4.1. Simulaciones .....   | 113 |
| 4.2. Construcción del modelo .....                                  | 113 |
| 4.3. Descripción modelo .....                                       | 115 |
| 4.3.1. Puntos de extracción .....                                   | 115 |
| 4.3.2. Piques de traspaso.....                                      | 123 |
| 4.3.3. Parámetros del modelo .....                                  | 126 |
| 4.3.4. Parámetros variables entre simulaciones .....                | 128 |
| 4.4. Validación del modelo de simulación .....                      | 129 |
| CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                            | 133 |
| CONCLUSIONES .....  | 138 |
| RECOMENDACIONES .....   | 141 |
| ANEXOS.....   | 144 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Tabla de autores para relación D/d .....   | 41  |
| Tabla 2. Número de componentes activos periodo 2000 – 2006.....   | 76  |
| Tabla 3. Formato información histórica puntos de extracción.....  | 76  |
| Tabla 4. Formato final de la información de piques de traspaso .....  | 78  |
| Tabla 5. Tabla resumen: piques de traspaso año 2006.....  | 84  |
| Tabla 6. Relación pique de traspaso – cruzada de transporte.....  | 85  |
| Tabla 7. Estadísticas básicas de tonelajes por piques de traspaso.....  | 87  |
| Tabla 8. Estadísticas básicas de número de eventos por piques de traspaso.....  | 88  |
| Tabla 9. Estadísticas básicas de colgaduras en piques de traspaso .....   | 91  |
| Tabla 10. Estadísticas básicas de eventos mecánicos de piques de traspaso .....   | 92  |
| Tabla 11. Tabla resumen del análisis de piques de traspaso .....  | 94  |
| Tabla 12. Ejemplo de agrupación de datos previo a la construcción de Curvas U .....   | 96  |
| Tabla 13. Ejemplo de columna de madurez .....   | 96  |
| Tabla 14. Ejemplo de producción total y diferencial intervalo de madurez .....  | 97  |
| Tabla 15. Ejemplo de número de eventos totales y diferencial de intervalo<br>de madurez .....   | 98  |
| Tabla 16. Ejemplo de tabla fina para construcción de la curva U .....   | 98  |
| Tabla 17. Ejemplo para la construcción de la curva PCC.....   | 99  |
| Tabla 18. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de<br>infraestructura minera subterránea y técnicas de reparación ..... | 112 |
| Tabla 19. Infraestructura y equipos.....  | 127 |
| Tabla 20. Especificación de equipos.....  | 127 |
| Tabla 21. Distancias .....  | 127 |
| Tabla 22. Parámetros corridos.....  | 128 |
| Tabla 23. Discretización Curva U.....   | 128 |
| Tabla 24. Escenarios de simulaciones .....  | 129 |
| Tabla 25. Parámetros variables en la simulación .....   | 133 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Modelo de programa de producción con grado de confiabilidad.....  | 15 |
| Figura 2. Eventos de rocas de sobretamaños .....  | 16 |
| Figura 3. Vista en planta del nivel de producción Palabora .....  | 22 |
| Figura 4. Vista en planta del nivel de producción mina Premier .....  | 23 |
| Figura 5. Izquierda: conexión entre niveles de producción transporte Derecha:<br>vista en planta del nivel de transporte mina Henderson .....   | 24 |
| Figura 6. Sistema de manejo de materiales multinivel con ferrocarriles,<br>mina Resolution .....  | 25 |
| Figura 7. Esquemización de la conexión entre 2 niveles de producción a diferentes<br>cotas con un único nivel de transporte en III Panel de Andina.....   | 25 |
| Figura 8. Esquema general del sistema de manejo de materiales del complejo<br>minero El Teniente .....  | 26 |
| Figura 9. Izquierda: conexión entre niveles de producción y transporte (TTE-5)<br>sector Regimiento. Derecha: Conexión entre niveles de producción y<br>transporte (TTE-8) sector Pilar norte ..... | 27 |
| Figura 10. Representación “curva de la bañera” .....  | 32 |
| Figura 11. Curvas U para puntos de extracción Mina PT Freeport DOZ (Indonesia).....   | 35 |
| Figura 12. Curva de producción característica .....   | 36 |
| Figura 13. Cálculo de números eventos esperado .....  | 38 |
| Figura 14. Cálculo de confiabilidad desde PCC .....   | 38 |
| Figura 15. Distribución de tonelaje de la PCC, para calcular la confiabilidad<br>de una componente.....   | 39 |
| Figura 16: Configuración pique de traspaso.....   | 41 |
| Figura 17. Tamaño de roca máximo vs diámetro mínimos pique (m) .....  | 42 |
| Figura 18. Ángulos para el que mineral fluya .....  | 43 |
| Figura 19. Configuraciones de parrillas.....  | 43 |
| Figura 20. Colgadura .....  | 44 |
| Figura 21. Ejemplo sistema continuo .....   | 46 |
| Figura 22. Evolución de una variable de un sistema continuo.....  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23: Evolución de una variable de un sistema discreto .....   | 47 |
| Figura 24. Evolución de una variable de un sistema orientado a eventos discretos .....  | 47 |
| Figura 25. Ciclo de vida del producto .....   | 56 |
| Figura 26. Fotografía de vista del relieve en el área de emplazamiento de la<br>mina Raúl .....   | 58 |
| Figura 27. Columna estratigráfica de la unidad minera Condestable .....   | 59 |
| Figura 28. Fotografía de vista de afloramientos de tufos y lavas volcánicas de<br>composición andesítica pertenecientes a la unidad Actinolita .....                                      | 62 |
| Figura 29. Fotografía de vista de los principales sistemas de fracturas en el<br>crucero XC-4375, mina Raúl .....   | 64 |
| Figura 30. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades<br>en las minas Condestable y Raúl .....  | 64 |
| Figura 31. Proyección estereográfica de los principales sistemas de<br>discontinuidades en la mina Raúl .....   | 65 |
| Figura 32. Representación de las fallas principales (color azul) y de los<br>principales sistemas de fracturas en el área de la mina Raúl<br>(Plano proporcionado por CMC, 2016) .....    | 65 |
| Figura 33. Modelo hidrogeológico de la unidad minera Condestable según la<br>actualización del estudio hidrogeológico a nivel de detalle realizado<br>por HGS Perú S.A (junio 2013) ..... | 66 |
| Figura 34. Ubicación PT Freeport Indonesia .....  | 72 |
| Figura 35. Cuerpos mineralizados distrito minero de Grasberg .....  | 73 |
| Figura 36. Esquema manejo de minerales DOZ .....  | 74 |
| Figura 37. Plano nivel de producción DOZ .....  | 74 |
| Figura 38. Zoom plano nivel de producción mina DOZ .....  | 75 |
| Figura 39. Plano nivel de transporte DOZ .....  | 75 |
| Figura 40. Tonelaje acumulado vs Pique de traspaso .....  | 77 |
| Figura 41. Diagrama conceptual de la obtención de tonelaje y eventos .....  | 79 |
| Figura 42. Producción piques de traspaso año 2006 .....   | 80 |
| Figura 43. Producción (total y promedio) piques de traspaso (sin datos insual) .....  | 81 |
| Figura 44. Productividad mensual y número de piques activos por periodo .....   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 45. Número de eventos por mes y tonelaje extraído por mes año 2006.....                 | 83  |
| Figura 46. Número de eventos por mes y tonelaje anuales por pique.....                         | 83  |
| Figura 47. Cruzados de transporte.....   | 86  |
| Figura 48. Tonelaje acumulado por pique y según relación HC .....                              | 86  |
| Figura 49. Producción para cada HC y mina.....   | 87  |
| Figura 50. Número de eventos por HC.....   | 88  |
| Figura 51. Producción mensual versus número de eventos mensuales por<br>pique de traspaso..... | 89  |
| Figura 52. Producción mensual versus número de eventos según sectorización.....                | 89  |
| Figura 53. Número de colgaduras por HC y mina .....  | 91  |
| Figura 54. Número de colgaduras por pique .....  | 92  |
| Figura 55. Número de eventos mecánicos por HC y mina .....                                     | 93  |
| Figura 56. Tonelaje promedio mensual versus número de eventos para<br>pique de traspaso.....   | 94  |
| Figura 57. Ejemplo de duración de eventos .....  | 95  |
| Figura 58. Resultado metodológico de la construcción de la curva U .....                       | 99  |
| Figura 59. Resultado construcción de curva PCC.....  | 100 |
| Figura 60. Curva U piques de traspaso DOZ .....  | 101 |
| Figura 61. Curva U colgaduras mina DOZ .....   | 102 |
| Figura 62. Curva U eventos mecánicos mina DOZ .....  | 102 |
| Figura 63. Resumen curvas U .....  | 103 |
| Figura 64. PCC versión preliminar mina DOZ .....   | 103 |
| Figura 65. PCC versión preliminar mina DOZ .....   | 104 |
| Figura 66. Ejemplo cálculo de frecuencia para 0 Kt acumulado .....                             | 106 |
| Figura 67. Ejemplo extrapolación tonelaje acumulado .....                                      | 107 |
| Figura 68. Extrapolación curva U .....   | 107 |
| Figura 69. Efecto plan y efecto umbral.....  | 108 |
| Figura 70. Regresión con respecto al 20 % mayor.....   | 109 |
| Figura 71. Configuración tipo modelo de simulación.....  | 114 |
| Figura 72. Discretización Curva U puntos de extracción .....                                   | 116 |
| Figura 73. Modelo en Arena punto de extracción .....   | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 74. Interferencias operacionales puntos de extracción.....                     | 122 |
| Figura 75. Discretización Curva U piques de traspaso.....                             | 124 |
| Figura 76. Modelo en arena pique de traspaso .....                                    | 125 |
| Figura 77. Cuantificación tonelaje vaciado al pique y modo de falla.....              | 126 |
| Figura 78. Discretización Curva U mina, para obtener tonelajes entre eventos.....     | 129 |
| Figura 79. Resultados de validación .....   | 130 |
| Figura 80. Dispersión entre tonelaje actual y mejor ajuste de las replicaciones ..... | 131 |
| Figura 81. Resultado del mejor ajuste.....  | 132 |
| Figura 82. PCC y estadísticas básicas no eventos .....                                | 134 |
| Figura 83. PCC y estadísticas básicas eventos cada 7kt .....                          | 134 |
| Figura 84. PCC y estadísticas básicas eventos cada 15kt .....                         | 135 |
| Figura 85. PCC y estadísticas básicas eventos cada 21kt .....                         | 135 |
| Figura 86. PCC y estadísticas básicas eventos cada 50kt .....                         | 135 |
| Figura 87. Resumen PCC simulaciones.....  | 136 |

## RESUMEN

En primera instancia, con la necesidad de reducir los costos en minería, los métodos de explotación subterráneos: Shrinkage, Block/Panel Caving poseen componentes de infraestructura de producción tales como puntos de extracción, subniveles de producción piques de traspaso y subniveles de transporte. Estos están sujetos a ser interrumpidos debido a diversos tipos de eventos geotécnicos tales como sobre tamaños, colgaduras, desplomes, reparación de carpetas de rodado, falla de martillos perforadores, entre otros.

Existe evidencia que la productividad de la mina y sus componentes de infraestructura dependen del número de eventos a experimentar en un periodo de tiempo. La productividad de la mina depende de la productividad de cada componente, siendo los tajos y piques de traspaso fundamentales en definir esta productividad.

El objetivo del presente trabajo es generar un modelo matemático para poder controlar la producción, basándose en sistema de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción minero, en particular en la productividad de cruzadas de producción.

El estudio se centra en el análisis de la mina DOZ de la compañía PT Freeport Indonesia, quienes cuentan con información histórica de producción e interferencias operacionales de los piques de traspaso del año 2006. Con estos se construyen curvas de productividad y frecuencia de eventos por pique, siendo las colgaduras el evento más frecuente (7 por mes) y los eventos mecánicos casi constantes durante todo el periodo (2 por mes). La producción de la mina se sostiene en los piques más maduros (80 – 130 Kt/mes) los que están relacionados con el cruzado de transporte.

En resumen, se propone considerar en la elaboración del plan de producción las interferencias operacionales ocurridas en los tajos de traspaso, ya que como se demostró la influencia de estas puede ser significativa a la hora de extraer lo que indica el plano.

## ABSTRACT

In the first instance, underground mining methods for subsidence such as Sublevel caving stoping, Block / Panel Caving have production infrastructure components such as extraction points, production crossings, transfer shafts and transport crossings. These are subject to being interrupted due to various types of geotechnical events such as oversizes, hangings, collapses, repair of rolling folders, failure of pickhammers, among others. There is evidence that the productivity of the mine and its infrastructure components depend on the number of events to experience in a period of time. The productivity of the mine depends on the productivity of each component, the transfer shafts being fundamental in defining this productivity.

The objective of this work is to quantify the effect of the handover system on the reliability of a mining production program, in particular on the productivity of production crosses. The study focuses on the analysis of the DOZ mine of the company PT Freeport Indonesia, who have historical information on production and operational interferences of the transfer shafts in 2006. With these, productivity curves and frequency of events per shaft are constructed. , being the hangings the most frequent event (7 per month) and the mechanical events almost constant throughout the period (2 per month). The mine's production is sustained in the more mature shafts (80 - 130 Kt / month), which are related to the transport crossover 2.

Production modeling allows defining event frequency curves (U Curve) which show the relationship between the frequency of occurrence of events and the accumulated tonnage of a component and productivity curves (Characteristic Production Curve) which describes the tons / period of a mining infrastructure component, based on the number of events experienced

In summary, it is proposed to consider in the production of the production plan the operational interferences that occurred in the transfer shafts, since as it was demonstrated the influence of these can be significant when extracting what the plan indicates.

## INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se generará un modelo matemático con un programa de confiabilidad en el método de explotación Shirinkage en el tajo Raúl 2 para un control de todas las tareas dentro del proyecto que es originar el programa de producción, para así determinar la capacidad del mineral y las leyes correspondientes al ser sacado el mineral en el periodo de funcionamiento de la mina, lo que vendría a ser la cantidad del potencial económico del yacimiento en una etapa

Por esta razón, en el desarrollo de planificación se encuentra situando por un solo comportamiento productivo de una mina, por lo tanto, se arriesgará el futuro económico de la mina, como es sus accesos de extracción como ganancia.

En esta, implantaremos una planificación de producción de confiabilidad, lo cual es un elemento principal para alcanzar las finalidades económicas y operacionales determinada en la definición de la empresa; ahora, el paralelismo entre el éxito operacional y el programa de producción que lo originó determinará diversas formas:

- Cumplir con el mineral producido en toneladas
- Cumplir con los volúmenes extraídos implicados.
- Cumplir con el tonelaje de los finos de la producción del metal
- Cumplir con los costos de producción.

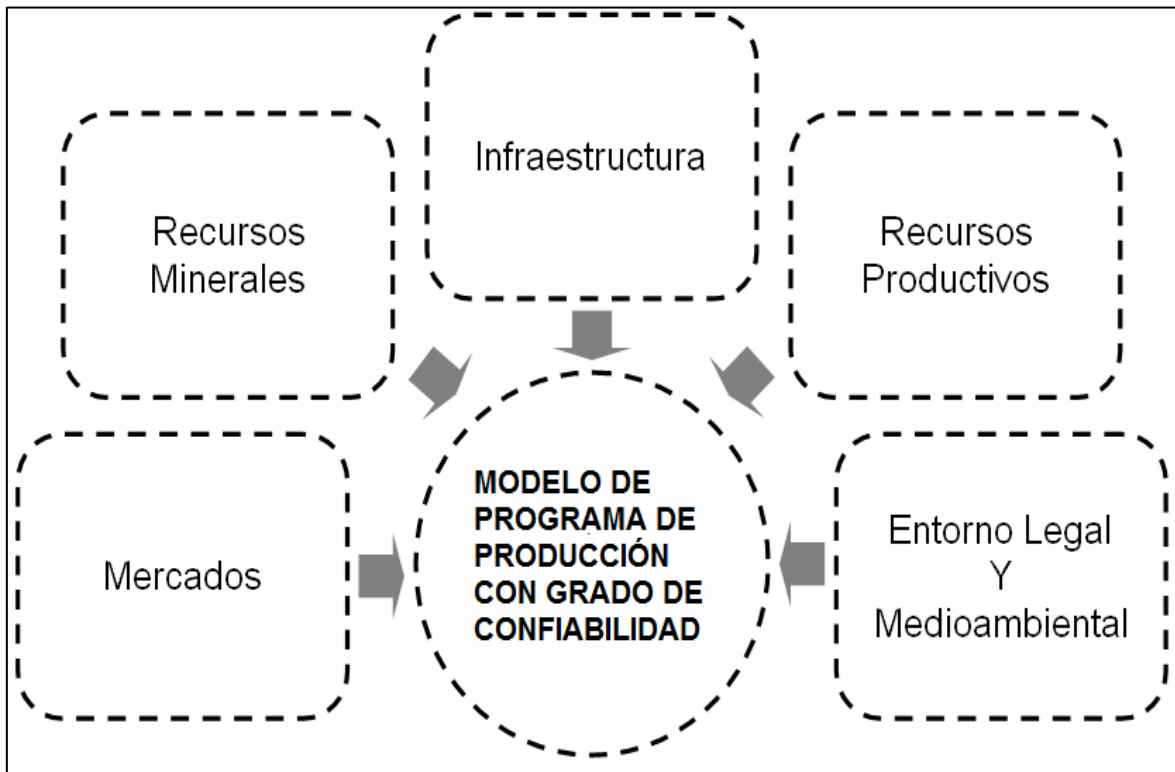
Desde esta perspectiva, el cumplimiento de un programa definido de producción con el modelo de confiabilidad tiene una estrategia donde está limitada por la duda resultante de varias fuentes, entre las que pueden citarse.

- La duda añadida a la disponibilidad de infraestructura productiva (galerías, piques de transferencia, tajos de producción, etc.).
- La duda añadida a la disponibilidad de bienes productivos (equipos de productividad, de auxilio, suministros en general, etc.).



- La duda añadida a la disponibilidad de bienes de los minerales (leyes, litologías, mineralización, calidad metalúrgica, etc.).
- La duda añadida en el proceder de los mercados (importe de los metales, suministros en general, mano de obra, etc.).

límites de concentración de contaminantes, etc.).



**Figura 1. Modelo de programa de producción con grado de confiabilidad**

En lo relacionado con los recursos de infraestructura en la explotación minera subterránea mediante el método de explotación Shirinkage, se tiene discontinuidades constantemente en eventos de interrupción que detienen el tráfico del mineral por algunas o todos los elementos de la infraestructura rentable del procedimiento minero, que simulan en el libre tráfico de mineral a través de estas y que habitualmente no se sopesan explícitamente en la construcción de un programa de producción.

En la siguiente presentación, se ve un incidente de sobre tamaño en un punto de extracción; el sobre tamaño del material hace inviable su carguío entonces debe ser

fragmentado por una voladura secundaria, con el propósito del tajo de extracción esté disponible nuevamente libre para el carguío.



**Figura 2. Eventos de rocas de sobretamaños**  
**Tomado de revista Cuba Minería**

# CAPÍTULO I

## EI PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

La presente tesis pretende plantear, explicar y poner en marcha un modelo matemático para cuantificar la confiabilidad de un plan de producción, comprendiendo a esta última como la probabilidad de al menos obtener el tonelaje programado en cada etapa del programa.

Se determinó que algunas zonas de las operaciones mineras pueden ser evaluadas como elementos individuales con el objeto de medir la confiabilidad de cada una de ellas en ejercicio del número deseado de eventos de obstaculizados con las singularidades productivas particulares de dicha entidad, para luego, analizando las listas de conectividad falladas por el diseño minero, configurar un sistema minero del método de explotación *Shrinkage Stopping* modelo, como una junta de elementos interconectadas. La operación realizada se enfoca en la minería subterránea del método explotación *Shrinkage* con numerosos niveles de infraestructura rentables (niveles de producción, transferencia y transporte).

El modelo propuesto fue calibrado y validado con la información operacional histórica de los sectores DOZ-ESZ de PT Freeport Indonesia, recopilada entre los años 2000 y 2006, obteniéndose una dispersión entre el modelo y los resultados históricos que fluctúa

entre un 2 y 6 % para puntos de extracción, entre un 2 y 6 % para túneles de producción y entre un 3 y 25 % para piques de transferencia, dependiendo de los datos considerados para dicho análisis. (1)

## **1.2. Formulación del problema**

Los éxitos alcanzados demuestran que la distribución del tránsito de mineral al intrínseco del sistema minero es notable en la probabilidad de cumplir un programa productivo, por lo que se sugiere especificar cómo se ingresa el mineral al sistema minero a través de los puntos de extracción, además por qué partes debe pasar este para lograr llegar a la planta de concentradora. A su vez, los experimentos numéricos materializados permiten exteriorizar que el programa de organización de una mina subterránea tiene dominio natural en la probabilidad de cumplir de un programa productivo supuesto.

Los éxitos de los experimentos realizados en el modelo de confiabilidad propuesto significan que el sistema de administrar los materiales aguas abajo de los lugares de extracción es un subsistema fundamental para lograr los objetivos productivos con una probabilidad de cumplimiento entregada, adecuados a que los cuellos de botella en el tránsito de mineral al interior del sistema minero se muestran mayormente en las galerías de transporte y los piques de transferencias, no así en los lugares de extracción.

Se propone emplear el indicador de confiabilidad con prevención dado que los resultados extraídos son firmemente dependientes de los criterios del mismo y estos, al instante de ser evaluados de información histórica operacional, hacen que la confiabilidad de los resultados sea dependiente de la calidad de esta información. De otra forma, dado que el modelo de confiabilidad considera solamente las competencias productivas del sistema de utilización de materiales y no otras delimitaciones propias a la minería de hundimiento, se propone que las permutas ejecutadas en los programas productivos fundadas en el modelo de confiabilidad sean reevaluados regularmente.

Analizando lo precedente, el modelo de confiabilidad expuesto permite encontrar que partes son críticas en el desarrollo del programa productivo dado y, con esto, ser el

sustento para planear transformaciones en el diseño, en la planificación de preparaciones y la planificación de producción de una forma de capitalizar una propuesta de valor que integre de manera explícita las competencias productivas auténticas del sistema minero.

### **1.3. Objetivo de la tesis**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Originar un modelo matemático para la operación de la confiabilidad de un proyecto de producción de un método minero subterráneo complicado.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✓ Componer una estrategia de trabajo estándar para el cálculo de confiabilidad de distintos tipos de elementos de una infraestructura minera.
- ✓ Originar una estrategia de trabajo con relación a los componentes de categorías en producción y transporte
- ✓ Conceptuar un valor del modelo de confiabilidad planteado.
- ✓ Desarrollar las cantidades de las reservas de infraestructura beneficiadas en el cumplimiento de un programa de producción.

### **1.4. Variables de la investigación**

#### **1.4.1. Variable independiente**

Diseño de producción con grado de confiabilidad (RCM)

#### **1.4.2. Variable dependiente**

Método de explotación *Shrinkage stoping* tajo Raúl 2 Cía. minera Condestable S.A.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

La minería de hundimiento se refiere a todas las operaciones mineras en las cuales el cuerpo mineral se hunde naturalmente después de la socavación de su base y el material hundido es recuperado usando puntos de extracción. (1)

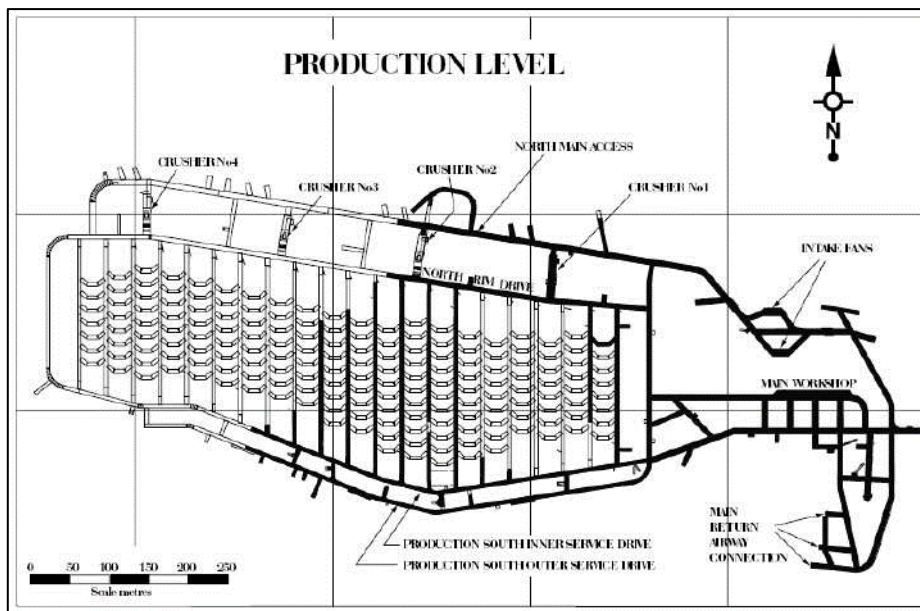
La definición anterior no es enfática en el hecho que en una operación minera subterránea el mineral debe trasportarse a una planta de procesamiento, hecho que toma relevancia al considerar que en las minas de Block y Panel Caving de la actualidad, los ritmos de explotación exigidos son siempre elevados, lo que se traduce en la necesidad de agrupar el mineral para facilitar su transporte a las instalaciones de beneficio. (Troncoso Bórquez, 2009)

Lo antes mencionado informa sobre la integración de todas las fuerzas productivas añadido a los puntos de extracción reconocidos por Laubscher, que logra estar presente en distintos niveles productivos y repartido singularmente de las más diversas estructuras, para hacer competente el desarrollo de transporte.

Realmente se interpreta en que un fraccionamiento del yacimiento puede conceptuarse a manera de “extraída” únicamente en el tiempo que llega a la planta de procesamiento, o sea, ha transcurrido por medio de un conjunto o algunos de los elementos de infraestructura que el sistema minero dispone para ser competente en su manejo.

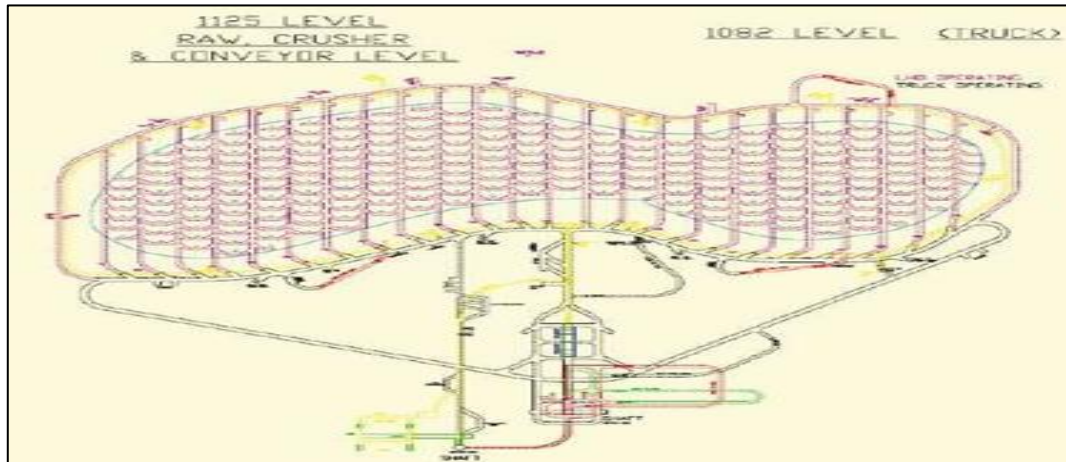
Integrando los procedimientos más sencillos, desde la perspectiva de todas sus fuerzas productivas, es la mina Palabora, en Sudáfrica, del cual nos referimos a su método de explotación es Block Caving.

Para evitar inconvenientes en el manejo de materiales (cuya capacidad se proyectó en 30,000t/d), el nivel de producción fue diseñado de tal manera que los equipos LHD vaciarán directamente en chancadores ubicados en los extremos de los cruzados de producción, conectados directamente a un pique que extrae el material de la mina para alimentar la planta de procesamiento, como esquematiza la siguiente figura: (2)



**Figura 3. Vista en planta del nivel de producción Palabora  
Tomado de Abarca 2008**

Ligeramente más complejo, desde el punto de vista de su infraestructura productiva, es el diseño de la mina de diamantes Premier, también explotada por Block Caving, que se muestra en la siguiente figura: (1)



**Figura 4. Vista en planta del nivel de producción mina Premier  
Tomado de Troncoso Bórquez 2009**

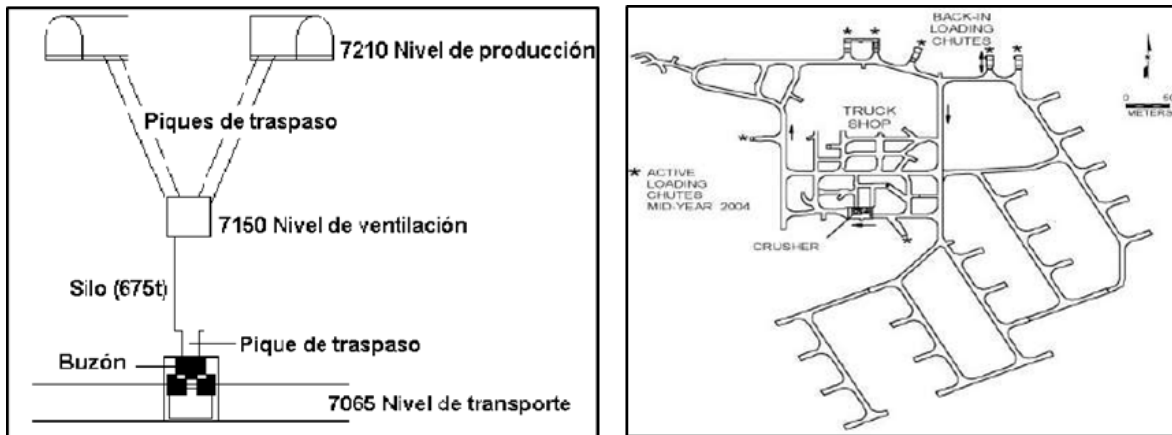
A diferencia de Palábora, puede observarse que el nivel de producción está diseñado para la operación en conjunto de 2 tipos de equipos: LHD y camiones.

Estos últimos son cargados en los extremos del cruzado de producción para luego vaciar el mineral en un chancador que alimenta un pique, que extrae el mineral de la mina.

Puede observarse en la figura anterior, que el diseño contempla un único cruzado de transporte, que conecta todos los cruzados de producción, lo cual lo convierte en una componente crítica del sistema de manejo de materiales, dado el hecho que su disponibilidad compromete la productividad del complejo.

Por su parte, el diseño del nivel 7210 m de la mina Henderson contempla un nivel de transporte ubicado 55 m por debajo del nivel de producción y conectado a este por piques de traspaso, como lo muestra la siguiente figura: (1)

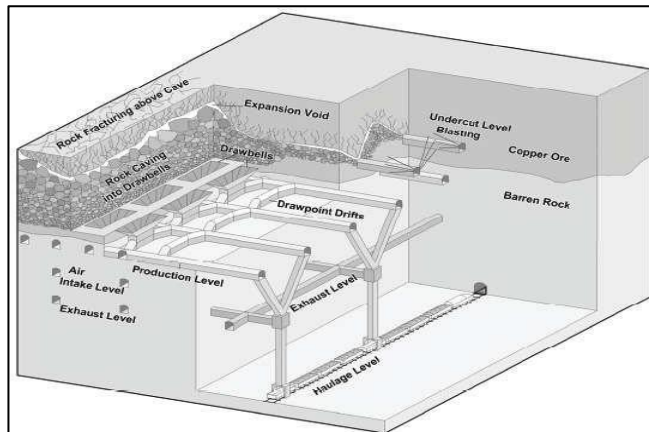




**Figura 5. Izquierda: conexión entre niveles de producción transporte mediante piques de traspaso. Derecha: vista en planta del nivel de transporte mina Henderson Tomado de Keskimani et Al, 2004**

El mineral extraído de los piques de traspaso es transportado por camiones hasta un chancador, donde luego se transporta por correas hasta la planta de procesamiento. Puede observarse que sobre los buzones del nivel de transporte existe un silo de 675 t de capacidad cuya función es permitir una carga más eficiente de los camiones. Sistemas similares se observan en el sector DOZ de PT Freeport Indonesia.

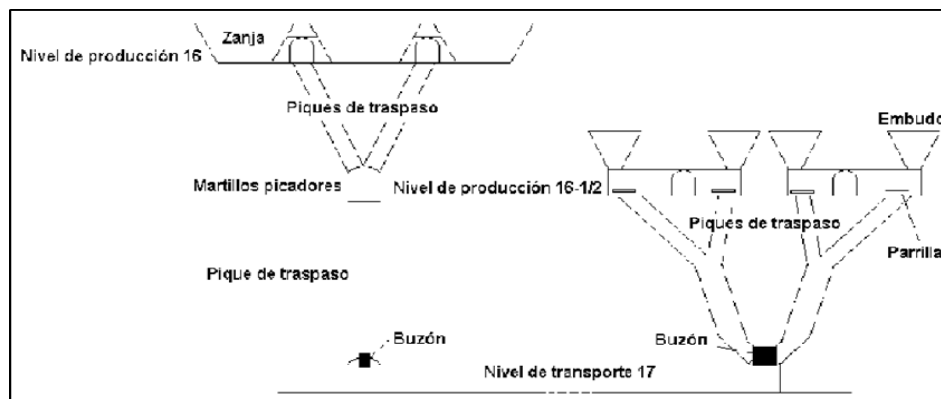
Los piques se conectan directamente entre el nivel de producción y transporte (no hay niveles intermedios ni una configuración en “Y” de los piques de traspaso) y el III Panel LHD de la división Andina, Codelco Chile, que cuenta con un nivel intermedio de martillos picadores, donde convergen 2 piques de traspaso, o Resolución, en Estados Unidos, donde el nivel de transporte considera la utilización de ferrocarriles. (1)



**Figura 6. Sistema de manejo de materiales multinivel con ferrocarriles, mina Resolution Tomado de Pascoe, Oddie y Edgar, 2008**

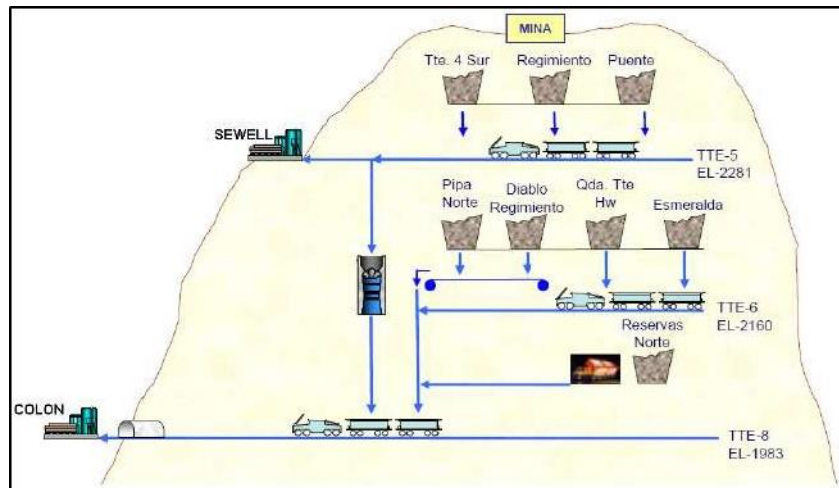
Al considerar que un complejo minero puede estar compuesto por múltiples niveles de producción y transporte, el problema del manejo de materiales al interior mina no es sencillo.

Por ejemplo, una solución relativamente simple para abordar este problema es la observada en el diseño del III panel de la división andina de Codelco, presentado por Aguayo et al (2004), cuyo nivel de producción se encuentra dividido en 2 zonas principales: sector LHD (ubicado en la cota 3236m, Nivel 16), sector Grizzly (ubicado en la cota 3210m, Nivel 16-1/2), de manera tal que comparten un nivel de transporte único en la cota 3185m (Nivel 17), esquematizado en la siguiente figura:



**Figura 7. Esquematización de la conexión entre 2 niveles de producción a diferentes cotas con un único nivel de transporte en III Panel de Andina Tomado de Aguayo et Al, 2004 (Troncoso Bórquez, 2009)**

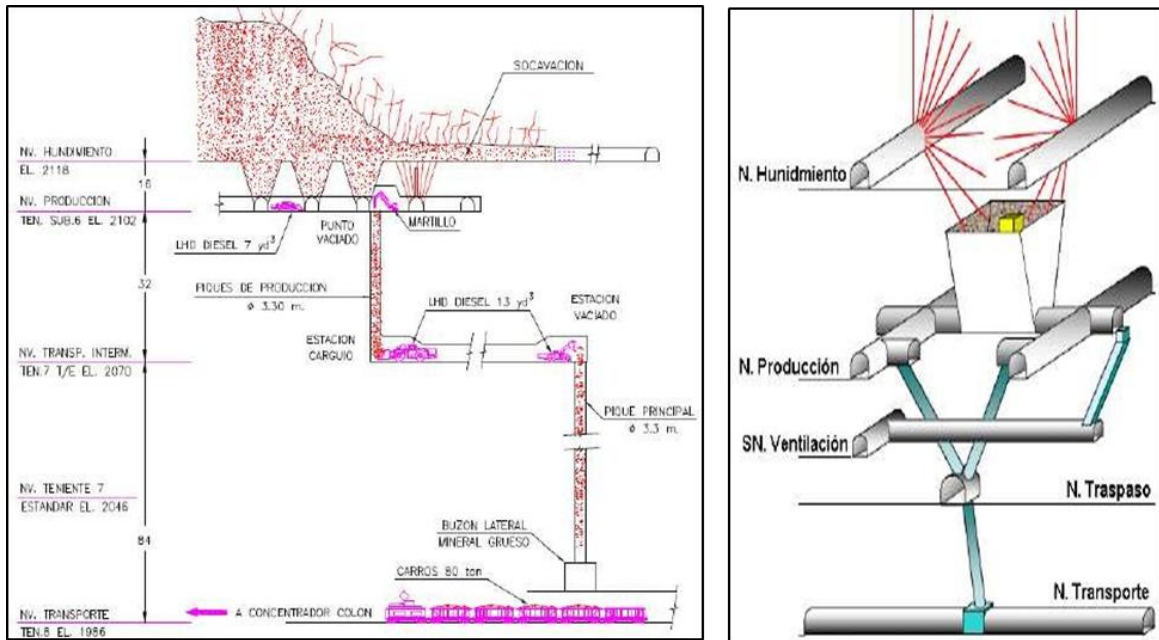
En cambio, supeditarse a la geometría del yacimiento, muchas ocasiones el resultado anterior no es a, por lo que se hace necesaria la consideración de varios niveles de producción y varios niveles de transporte intermedio para la concentración del mineral y su envío eficiente a la planta de procesamiento, como se muestra en la siguiente figura: (1)



**Figura 8. Esquema general del sistema de manejo de materiales del complejo minero El Teniente Tomado de Aguayo et Al, 2004 (Troncoso Bórquez, 2009)**

La figura anterior esquematiza de manera general el sistema de manejo de materiales del complejo minero El Teniente.

Puntualmente, se pueden encontrar diversas alternativas para la conexión entre diferentes niveles, como lo muestra la siguiente figura:



**Figura 9. Izquierda: conexión entre niveles de producción y transporte (TTE-5) sector Regimiento. Derecha: Conexión entre niveles de producción y transporte (TTE-8) sector Pilar norte Tomado de Aguayo et Al, 2004. (Troncoso Bórquez, 2009)**

Naturalmente, las capacidades productivas de cada uno de los sistemas revisados anteriormente son diferentes, al igual que su vulnerabilidad a la ocurrencia de eventos de interferencia, por lo que el entendimiento y cuantificación de sus capacidades es fundamental para el proceso de planificación de producción, debido a que cada tonelada que ingresa al sistema a través de un punto de extracción, debe pasar a través de esta infraestructura antes de ser entregada a la planta de procesamiento. (1)

## 2.2. Planificación minera

Se precisa de acuerdo al desarrollo que por medio de procedimientos del mineral se transfigura en la óptima utilidad productiva para el dueño, disponiéndose con los objetivos estratégicos de la compañía. Esta empresa se somete a limitaciones resultantes de las reservas del mineral, del mercado, existencias de reservas de humanos y capital, tecnología, entorno social y medio ambiental en el cual se desenvuelve, entre muchos otros.

### **La planificación se puede clasificar de la siguiente manera:**

Programación estratégica: el fundamental objetivo es regularizar el mercado con los un conjunto de elementos utilizables y la misión y visión del dueño.

Programación conceptual: es el desarrollo que limita las reservas de materiales para llegar al término de la producción definida como parte de la programación estratégica y, que regularme, se encuadra dentro del dominio del proyecto. En este periodo es donde se determina la posibilidad y vida de la mina, asimismo de las reservas.

Programación operativa: cuando la mina se encuentra en operación, se ejecutan variadas actividades de optimización de equipos y trasformaciones que encaminan a la conclusión del plan minero, determinado en la programación conceptual.

En este periodo se interpreta la retroalimentación hacia la programación conceptual, de manera de delimitar varios conceptos y determinar los proyectos que autoricen disponerse con el plan minero. La participación de la programación operativa al desarrollo de planificación es primordial, desde la perspectiva de demarcar los indicadores operacionales.

Los límites temporales de programación se determinan como un instrumento para aplicar la incertidumbre dentro del desarrollo minero, de esta manera pueden definirse los siguientes horizontes:

Programación de corto plazo: su papel más importante es la compilación y aplicación de la información operacional a manera de retroalimentar al largo plazo. En otro orden, se inquieta de determinar indicadores que se someten de modificar los modelos que mantengan la programación.

Programación de largo plazo: determina la envolvente económica, el método de explotación, series de explotaciones y leyes de corte.

Programación de mediano plazo: se responsabiliza de habilitar a los patrones que defienden la programación de largo plazo. Elaboran planes de producción que permitan autorizar a la operación a las metas de producción determinadas.

Encaminándose a formar la programación de la producción en la minería de block o panel *Caving*, *Shrinkage stopping* naturalme al instante de efectuar los objetivos de mediano periodo que costeen las premisas de operaciones para el año que viene.

Se acostumbra aproximar la posibilidad rentable del procedimiento minero como la adición de las posibilidades rentables individuales de cada punto de extracción, que se localizan demarcadas por la llamada velocidad de extracción, la que pertenece al tonelaje limite que puede sacarse en un ciclo de tiempo (generalmente en días) por un definido punto sin examinar la variabilidad en la disposición de infraestructura.

Por el contrario, acostumbran dejar a la maniobra minera a la planificación de las celeridades de arreglo de interferencias operacionales, no estando en relación transparente y objetiva entre éstas y la programación de la producción de mediano plazo. Adicionando al hecho que alguna interferencia en cualquier componente productivo del método minero afectar en la productividad (en mayor o menor grado), se procede que, dado que la programación de mediano plazo no adjunta de manera efectiva el suceso y compensación de eventos interferentes con la producción, pesadamente pueden originar planes mineros anuales que la operación pueda lograr.

### **2.3. Estado del problema**

Según Rubio, actualmente los objetivos de producción son el resultado de programas de producción, calculados con parámetros de planificación que no se desarrollan en función del comportamiento operacional y no están unidos a modelos fundamentales que describen la conducta geotécnica del macizo rocoso. Esto se debe, principalmente, a que en las actuales planificaciones los contratiempos relacionados con procesos geotécnicos y procesos de hundimiento en el macizo rocoso no son contemplados, provocando a menudo una sobreestimación de la capacidad de la mina. (3)

Diering afirma que, aunque existen programas relacionados con la aplicación al diseño y la evaluación de operaciones en *Block Caving*, éstos asumen, por ejemplo, que los puntos de extracción estarán activos más o menos constantemente, desarrollando la planificación de los puntos de extracción con los mínimos necesarios, lo que no deja holguras frente a eventos y manifiesta una falta de afinamiento para planificación de corto plazo. (4)

Según Hadjigeorgiou, el flujo de mineral que pasa por los piques de traspaso es fundamental en el rendimiento económico de las operaciones mineras, sin embargo, no parece recibir el mismo interés que otros componentes de la mina, ya que sólo cuando éste no cumple su objetivo, el diseño y operación pasa a ser fundamental en la operación de la mina. (5)

Es por esto, que se hace esencial el estudiar la influencia de la geometría, disposición de parrillas, distribución granulométrica del flujo de materiales a pasar, factor de forma, etc. Todo lo anteriormente mencionado, contribuye a una mejor comprensión y proporciona una serie de directrices para ayudar a limitar la ocurrencia de eventos de interferencia operacional.

Estas interrupciones afectan la disponibilidad de la infraestructura minera que está directamente relacionada con la capacidad de producción de la mina y, al no ser consideradas en la planificación, se generan objetivos de producción muy optimistas que posteriormente, provocarán que se usen más recursos de los planificados, arriesgando el original valor de la mina e incluso no alcanzando las promesas productivas, destruyendo el valor del proyecto.

Además, Rubio, Scott, Dunbar, Hall proponen que, aun cuando los actuales métodos de programación de la producción puedan predecir el tonelaje global a ser extraído por un periodo acertadamente, hay a menudo una varianza de tonelaje significativo entre lo estimado y lo realmente producido por un punto de extracción (5)

Por lo anterior, es posible afirmar que el éxito en la consecución de un plan de producción, dependerá de la habilidad del sistema de planificación minera para incorporar incertidumbres encontradas en la conducta del macizo rocoso y en el sistema minero, por lo que existe la necesidad de introducir algoritmos que sean capaces de adaptarse a las condiciones dinámicas de una mina subterránea.

Es decir, se necesita un sistema de planificación que reduzca la incertidumbre del programa de producción debido a la conducta geotécnica, que incorpore la conducta actual de la mina y use sus datos de producción como registros de producción, disponibilidad de la infraestructura, indicadores de stress, mapeos de fragmentación y características geotécnicas de la roca.

#### **2.4. Principio de la teoría de la confiabilidad**

El sistema de confiabilidad es definido por Rama Kumar, como la probabilidad de que el sistema funcionará por un rango específico de tiempo bajo determinadas condiciones. Además, afirma que para determinarlo existen tres pasos fundamentales que son: (6)

- Construir el modelo de confiabilidad (representativo y simple, está basado en suposiciones que deben ser válidas, descomponible y operativo).
- Analizar el modelo y calcular un índice de falla (uno para cada componente).
- Evaluar e interpretar los resultados (precisión de los resultados, comparar con otros períodos ya conocidos).

Por otro lado, Basovsky, define la confiabilidad como un sistema que expresa en números la oportunidad de un equipo de operar sin falla por un período de tiempo, en un ambiente para el cual fue diseñado, y afirma que la confiabilidad de un equipo complejo dependerá de la confiabilidad de sus componentes y éstos de su tasa de falla. (5)

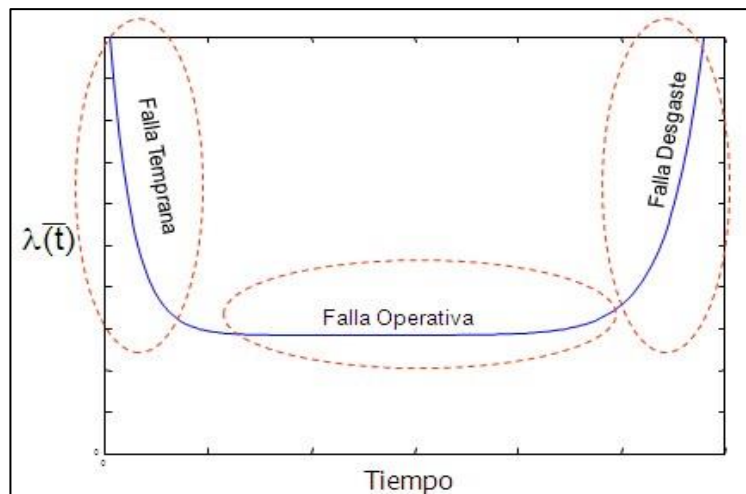
En ambos casos, la tasa de falla es incorporada como un indicador que nos permite estimar cuántas fallas ocurrirán por período de tiempo y su inversa nos mostrará el tiempo promedio entre cada falla.



La confiabilidad se define como la probabilidad que un sistema de ingeniería funcione de acuerdo a su diseño incorporando el comportamiento intrínseco a la falla.

Además, según Basovsky, la tasa de falla se puede descomponer en tres etapas que han sido observadas en componentes o equipos mecánicos. Estas conforman la llamada curva tipo “tina de baño” (figura 10) y se describen a continuación: (5)

- **Fallas tempranas.** Son producto de una mala producción y se solucionan con procesos llamados “*burn-in*” o “*debugging*” que es probar el equipo y reemplazar lo que falla antes de ponerlo en operación.
- **Fallas operacionales.** Ocurren cuando el equipo ya está en operación, no se pueden eliminar ni predecir, pero siguen ciertas reglas de comportamiento en que la frecuencia por largos períodos de tiempo es aproximadamente constante.
- **Fallas de desgaste.** Ocurren al final de la vida útil del equipo producto de desgaste y cuando los componentes tienen poca mantención. La ventaja de éstas es que se pueden predecir.



**Figura 10. Representación “curva de la bañera”**

Cada una de estas etapas sigue una distribución específica que para su determinación deben ser usados diferentes modelos matemáticos.

### 2.4.1. Confiabilidad de múltiples componentes

Calabro, afirma que múltiples componentes relacionados pueden estar unidos de cuatro formas:

- En serie.
- En Paralelo.
- Series paralelas.
- Paralelos en Series.

Si cada componente tiene una confiabilidad será: (con  $R(T)_i$  entonces la confiabilidad del sistema será con  $R(T)_i + Q(T)_i = 1$ )

#### a. Sistema en Serie.

$$R^{SIST} = \prod_i R_i$$

En este sistema si falla un componente falla todo el sistema.

#### b. Sistema en paralelo

$$1 - R^{SIST} = \prod_i (1 - R_i)$$

En este sistema tienen que fallar todos los componentes para que falle todo el sistema.

#### c. Sistema en series paralelas

Este sistema está compuesto de series en paralelo, si falla un componente de una serie la serie completa falla, pero el sistema sigue trabajando con las otras series que están en paralelo a la que falló. Para que falle totalmente el sistema, debe fallar al menos un componente de cada serie.

#### d. Sistema paralelo en serie

$$1 - R^{SIST} = \prod_i (1 - R_i^{SERIES})$$

Este sistema está compuesto de series en paralelo, si falla un componente de una serie la serie completa falla, pero el sistema sigue trabajando con las otras series que están en paralelo a la que falló.

Para que falle totalmente el sistema, debe fallar al menos un componente de cada serie.

#### 2.4.2. Confiabilidad aplicada a la planificación minera

Con relación a la aplicación de la confiabilidad en planificación minera (tema desarrollado por Rubio, Kazakidis and Scoble), inicialmente se presentó un modelo de confiabilidad basado en la infraestructura productiva, capaz de calcular la confiabilidad de un plan de producción en una mina que contaba únicamente con un nivel de producción. (5)

Sin embargo, actualmente las minas de *block y panel caving*, *sublevel caving* presentan un diseño minero productivo complejo, con varios niveles de infraestructura que deben ser considerados en el cálculo de la confiabilidad de un programa de producción.

El modelo original de Rubio ha sido modificado en trabajos ya terminados, pero aún no publicados. En los próximos capítulos, se describe este nuevo modelo.

#### 2.4.3. Precedentes (modelo de confiabilidad)

A fin de importar la idea de confiabilidad, hay algunas determinaciones que tienen que ser puntualizadas con el fin de expresar los estándares matemáticos que favorecen los cálculos de confiabilidad.

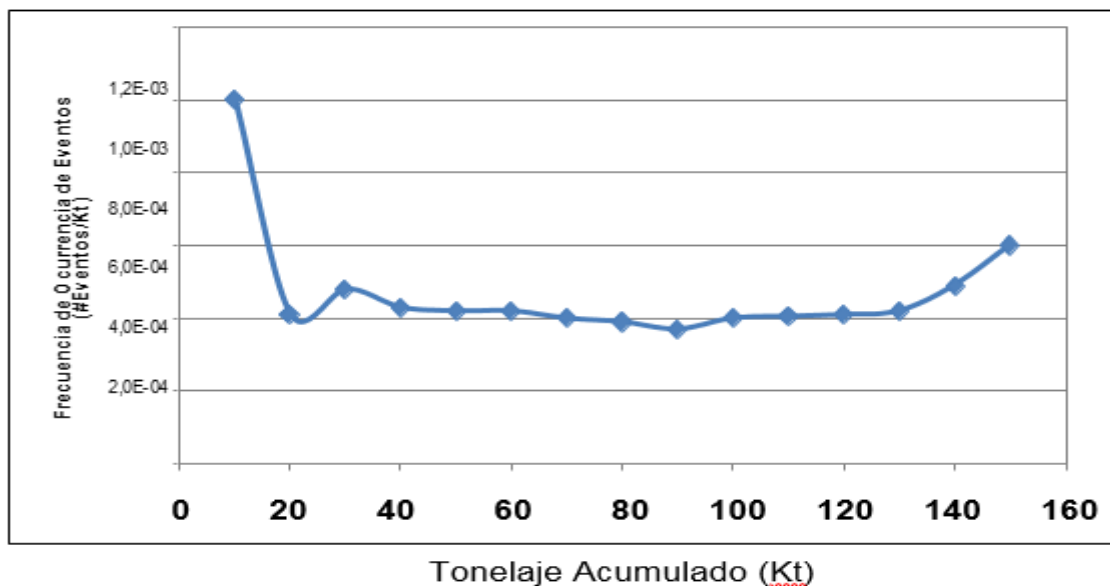
- Confiabilidad (del proyecto de producción): es la posibilidad de al menos conseguir el tonelaje final del programa de producción, en la etapa establecido.
- Falla: cuando el programa minero no concluye los tonelajes determinados en la distancia provisional referente.
- Evento: suspensión que detiene el transporte de mineral a través de un elemento minero, pero que no obligatoriamente hace fracasar el sistema.

#### 2.4.4. Parámetros del modelo

##### Curvas en U

Modela la conexión entre la frecuencia de sucesos de eventos, que se demarca como el número de eventos por tonelada y la capacidad acumulada que se ha separado (perfeccionamiento del elemento).

En especial hacia una materia de extracción, la curva U es idéntico a la siguiente figura:



**Figura 11. Curvas U para puntos de extracción Mina PT Freeport DOZ (Indonesia)**

La curva U se aprovecha para conseguir el número previsto de eventos en un definido intermedio de tonelaje  $[t_i, t_i + t_i^p]$ , donde  $t_i^p$  es la capacidad programada para  $i^{\text{ésima}}$  elemento en un ciclo de tiempo dado y  $t_i$  es la madurez actual del elemento. El número previsto de eventos puede ser conocido como:

$$\#Eventos_{\text{número}} = \int_{t_i}^{t_i + t_i^p} \lambda(t) dt$$

#### 2.4.5. Curva de Producción Característica (PCC)

La Curva de Producción Característica (PCC) detalla la productividad (toneladas / período) de un elemento del fundamento de la minera, en ejercicio del número de eventos acostumbrados.

Por ejemplo, la figura 12 demuestra los éxitos de una apariencia para evaluar la PCC de un lugar de extracción, que se suspende con distintas frecuencias de eventos. Se puede ver, que el número deseado de eventos se inclina a la productividad del punto de extracción. El propio ejercicio alcance ejercerse con la investigación de la ascendencia histórica de la mina, con el fin de lograr la PCC de cualquier elemento.

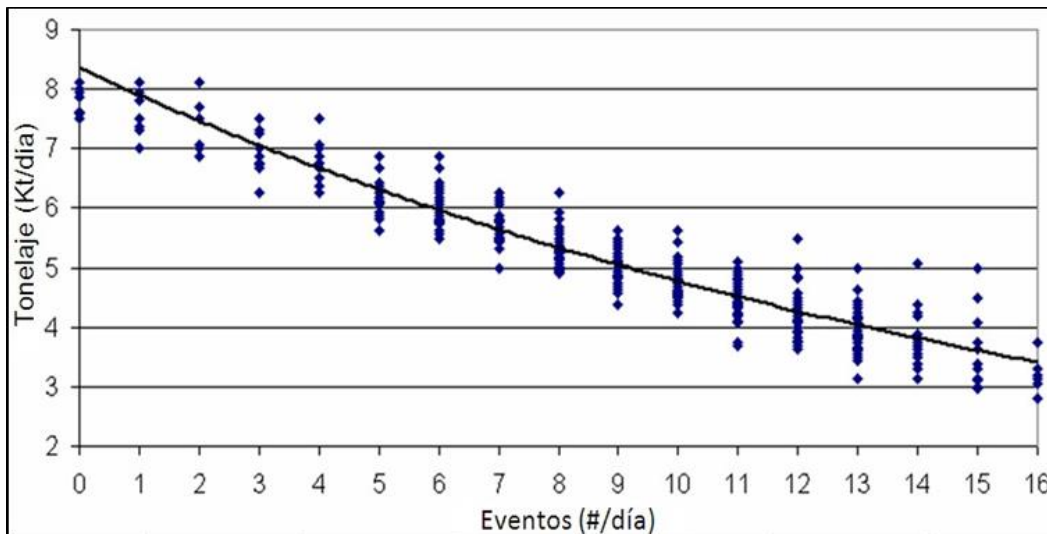


Figura 12. Curva de producción característica

La edificación de una PCC se sustenta en la información histórica del manejo, así como la naturaleza de la componente, el tonelaje separado por turno, y lo damas.

Hay varios cuestionamientos fundamentales concernientes con la construcción de la curva pasadas:

- La máxima productividad de una componente está reducida por el programa de producción, apropiada a que obligatoriamente no se programe un tonelaje equivalente a la capacidad productiva máxima en un ciclo concreto.
- En la praxis, el digito de trazos obtenidos por todo número de eventos lograr ser carente y no acceder el arreglo acomodado de un modelo de organización de posibilidad y, en resultado, no comunicar comunicaciones de confiabilidad apropiados adecuados.

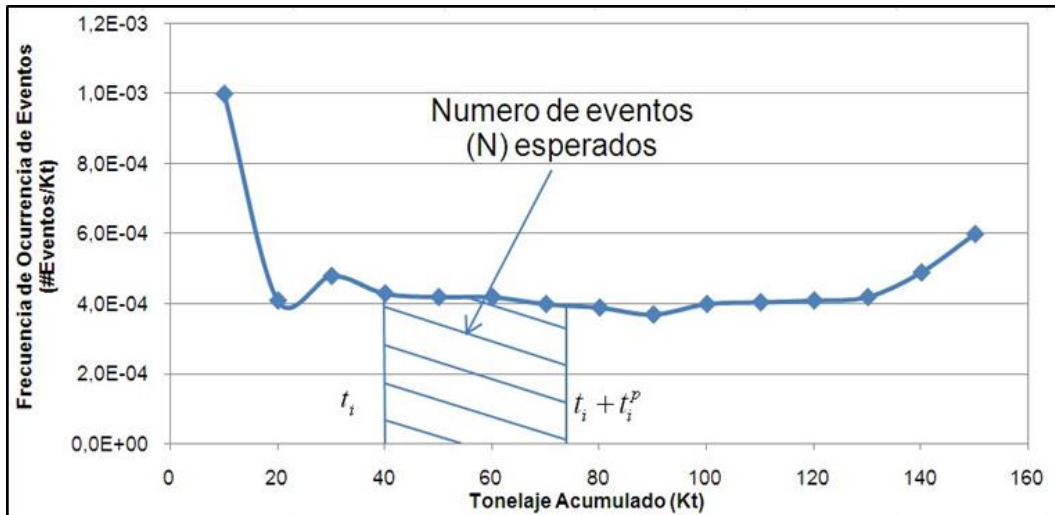
Para prevenir la incertidumbre exteriorizado en el primer punto, se puede componer un modelo de simulación que exprese el proceder de la componente observada en límites de productividad.

En cambio, este representativo debe ser amplio de adjuntar el acontecimiento de eventos de injerencia y su compensación conforme a los programas empleadas en el programa minero observado.

### **Cálculo de Confiabilidad de las Componentes del Sistema**

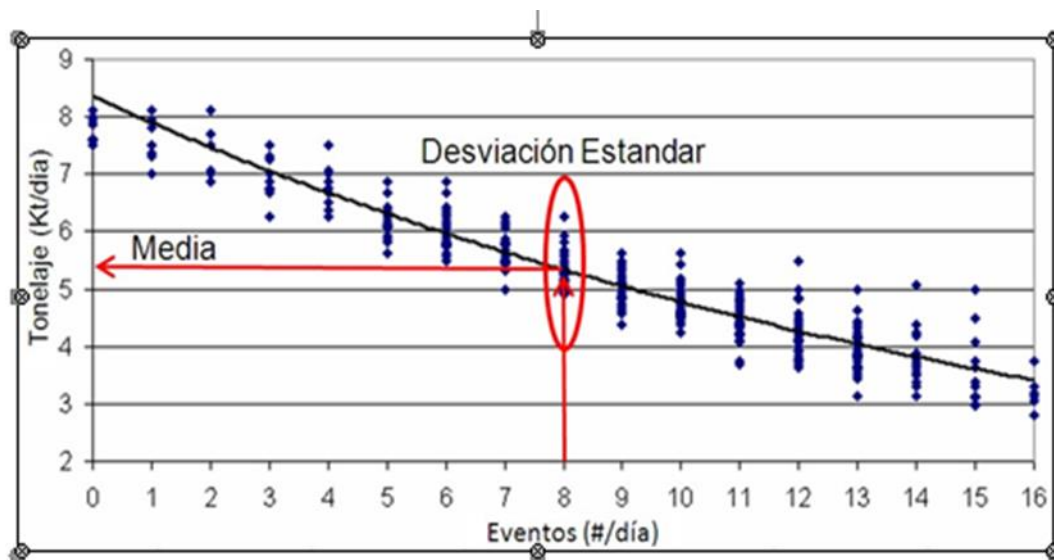
Todo componente del programa posee su adecuada PCC. La curva se emplea para alcanzar la confiabilidad de un componente característico, en enumeración a su tonelaje programado. En el trascurso, se declara la técnica para alcanzar a la confiabilidad de una componente dada su PCC, el tonelaje programado ( $t_i$  y su curva  $U$   $\lambda(t)$ ):

- a) Con el tonelaje y la madurez de los componentes, contar el número esperado de eventos  $N$  de la curva  $U$ . (Figura 13)



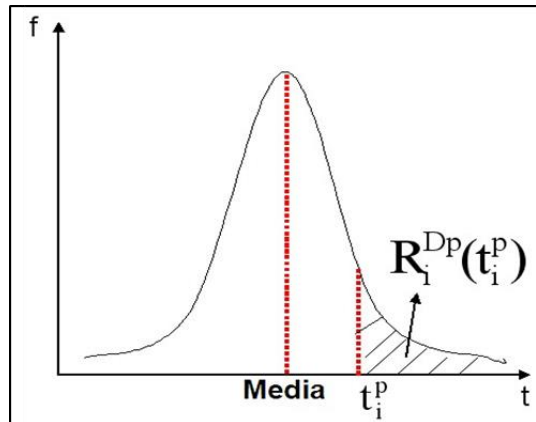
**Figura 13. Cálculo de números eventos esperado**

- b) Recuperar desde la PCC, ingresando por el eje de las abscisas con el valor de N, y recolectar todos los puntos de productividad acompañados (media y desviación estándar)



**Figura 14. Cálculo de confiabilidad desde PCC**

- c) Describir el subsiguiente histograma (Figura 15) con los valores de la media y desviación estándar alcanzada (el patrón de distribución de probabilidad viene de la productividad de los puntos rescatados de la PCC, la cual no obligatoriamente es Gaussiana):



**Figura 15. Distribución de tonelaje de la PCC, para calcular la confiabilidad de una componente**

- d) El área bajo la curva, desde  $t_i^p$  hasta el tiempo infinito, simboliza la posibilidad de lograr un tonelaje superior o igual a  $t_i^p$  para la componente especificada. Por consiguiente, es la confiabilidad de la componente “i” para el tonelaje  $t_i^p$  denotado por  $R_i^{Dp}(t_i^p)$ . Debe observarse que superior sea el tonelaje programado, bajo será la confiabilidad.

#### 2.4.6. Resultados de la metodología

Según Rubio, el modelo de confiabilidad aplicado a la planificación minera produce dos resultados: (5)

- Confiabilidad del sistema.
- Tonelaje esperado por período, corresponde al tonelaje más probable que sería producido en un período dado el programa de producción.

Ventilación y otros, se puede lograr una mejorada confiabilidad en la capacidad de lograr la requerida tasa de producción con una reducción del riesgo.

Además, Rubio plantea que la confiabilidad del plan de producción está integrada por componentes como la secuencia de desarrollo del punto de extracción, tasa de extracción y la tasa de desarrollo, por lo que, todos estos parámetros combinados con el sistema de confiabilidad redefinen la capacidad de producción de una mina, con un método de extracción como el Block Caving y sub level Caving. (5)



Rubio, Scott, Dunbar y Hall, proponen que una de las ventajas de esta metodología es que puede integrar todos los componentes operacionales de un sistema de producción, incluyendo las tasas de falla de los componentes como parte de la pronosticada disponibilidad del sistema de producción. (5)

Por todo esto es que Rubio afirma que el programa de producción con alta confiabilidad tiende a minimizar la varianza, entre la actual producción del punto de extracción y la pronosticada.

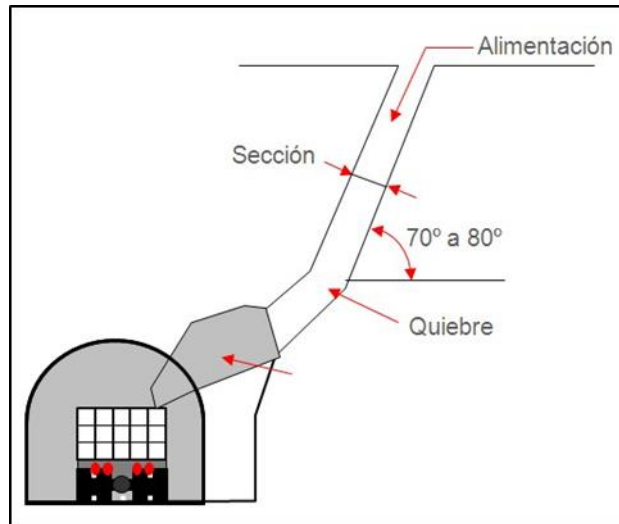
#### **2.4.7. Piques de traspaso**

La rentabilidad de una explotación minera está fuertemente influenciada por el desempeño de su sistema de manejo de materiales. En las minas subterráneas, para el paso de mineral se deben proporcionar métodos de bajo costo para el transporte de material, siendo los más comunes los métodos gravitacionales a través de largas distancias verticales (piques de traspaso).

Según Lessard y Hadjigeorgiou, los problemas relacionados con los piques de traspaso, pueden dar lugar a la interrupción de la producción con importantes consecuencias económicas. Actualmente, existen diversos estudios relacionados con la geometría, disposición y flujo al interior de los piques de traspaso. Sin embargo, existe casi nula información (data) de productividades e interferencias operaciones, lo que hace casi desconocida la influencia que éstos pueden tener en la productividad y confiabilidad de un sistema minero.

#### **Diseño**

Un pique de traspaso puede ser representado de acuerdo a la siguiente figura:



**Figura 16: Configuración pique de traspaso**

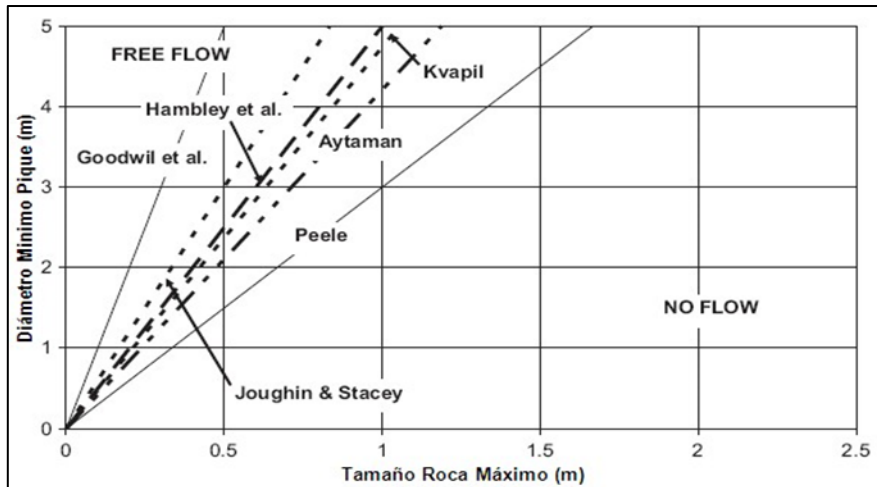
Donde los principales parámetros a definir para su diseño son:

- **Diámetro del pique de traspaso (D):** está relacionado con el tamaño máximo del mineral que va a pasar por éste (d). Diversos autores han definido una relación D/d de acuerdo a la presentado en la figura 17.

**Tabla 1. Tabla de autores para relación D/d**

| Referencia       |         | Flujo Libre |
|------------------|---------|-------------|
| Peele            | (D/d) > | 3           |
| Aytaman          | (D/d) > | 4.21        |
| Kvapil           | (D/d) > | 4.74        |
| Hambley          | (D/d) > | 5           |
| Goodwill         | (D/d) > | 10          |
| Joughin & Stacey | (D/d) > | 6           |

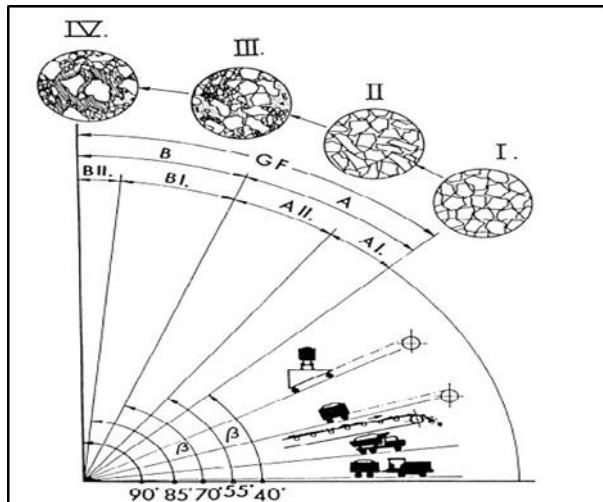
**Tomado de Universidad de Concepción**



**Figura 17. Tamaño de roca máximo vs diámetro mínimos pique (m)**  
**Tomado de Universidad de Concepción**

Por ejemplo, para colpas de tamaños máximos de 1 metro el diámetro del pique varía entre 3 (Peele) y 9 (Goodwil) metros.

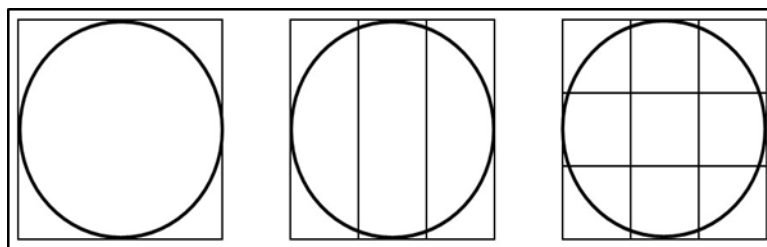
- La movilidad del medio particulado depende de su composición. Material fino tiende a producir cohesión y, por lo tanto, a disminuir la movilidad de conjunto de partículas.
- Presencia de agua tiende a aumentar dicha cohesión.
- El ángulo, al cual el material fluye, es característico de cada material, esto se aprecia en la figura 18



**Figura 18. Ángulos para el que mineral fluya**  
**Tomado de DOZ-ESZ PT Freeport Indonesia**

#### 2.4.8. Diseño de parrillas

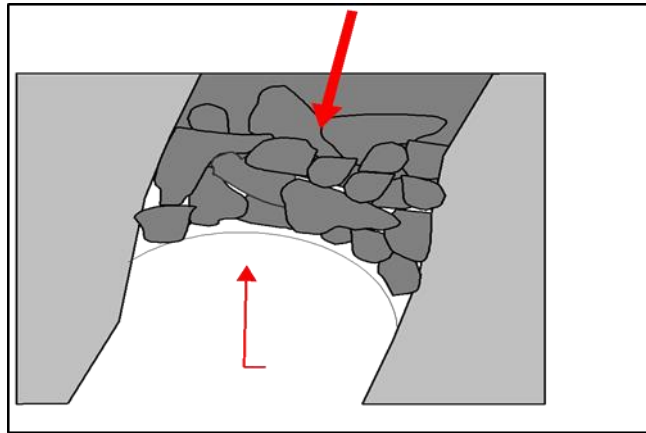
Existen diversas configuraciones de parrillas (Figura 19), siendo el objetivo principal de estas controlar el tamaño máximo de mineral que es vaciado a los piques de traspaso, sin embargo, el disponer de parrillas, lleva consigo la utilización de un mayor recurso, debido a que se necesitará el uso de un martillo picador para fragmentar la roca que es mayor a la abertura de la parrilla.



**Figura 19. Configuraciones de parrillas**

#### 2.4.9. Interferencias operacionales

Las interferencias operacionales más comunes en los piques de traspaso son las colgadas, las cuales pueden influir directamente en la productividad, donde su reparación es complicada y peligrosa. Las colgadas se producen debido a la compactación de mineral en el pique, el que deja de fluir libremente.



**Figura 20. Colgadura**

La probabilidad de colgadura en un pique o tajo puede ser obtenida de la experiencia, existiendo casi nulos estudios y análisis de los casos. Para que exista una colgadura en el caso de materiales no cohesivos, se debe al entrapamiento de granos. En este caso, puede disminuir mediante el aumento del diámetro del pique, ya que el arco se hace inestable. Este aumento de diámetros debe mantener la relación  $D/d$  anteriormente mencionada.

Los factores que influyen en la formación del arco son:

- Distribución de tamaños de los fragmentos de roca.
- Tamaño máximo de los fragmentos.
- Forma de los fragmentos.
- Viscosidad de la roca.
- Material fino entre las colpas.
- Contenido de humedad.
- Efectos de trituración que sufre la roca al pasar por el pique.

#### **2.4.10. Simulación**

La simulación es un método de control estadístico ponderado para cuantificar el performance de teorías determinísticas y probabilísticas complejos. Se emplea cuando los patrones analíticos no son autosuficientes para explicar una concentración o éste es muy complejo para traducirlo en expresiones matemáticas. Las experiencias de

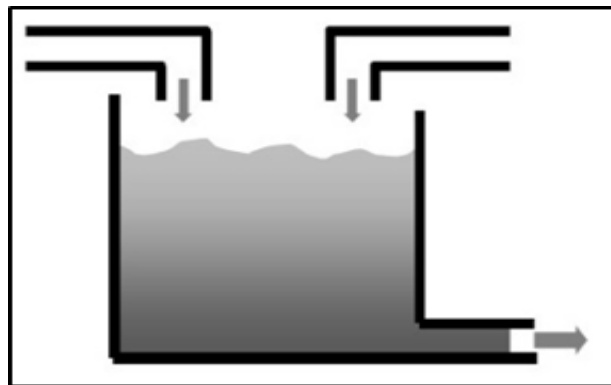
muestreo se realizan sobre el patrón y no en el sistema real, porque sería muy costoso y muchas veces imposible de efectuarlo.

Para poder entender la realidad y toda la complejidad que un programa puede tolerar, ha sido necesario componer artificialmente objetos y experimentar con ellos proactivamente antes de interactuar con el programa real. Éstos pueden ser figurados por diferentes modelos los cuales se determinan a continuación:

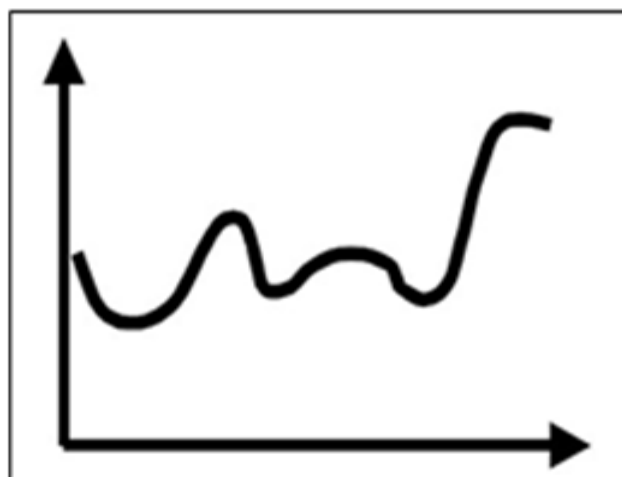
- **Modelos físicos:** son los que más se parecen a la realidad, se someten de modelar transformaciones tales como:
  - Modelos analógicos: se facultan de mostrar una propiedad delimitada de un objeto o sistema.
  - Modelos denominados juegos administrativos: comienza a implicarse el comportamiento del ser humano. Ejemplo: patrones de planeación, estrategias militares.
- **Modelos matemáticos:** fundamenta en una serie de aproximaciones e hipótesis (ambas siempre cuantitativas) con relación de cómo funciona el programa. Generalmente, pueden formularse mediante ecuaciones de varias variables. Su principal desarrollo es que resultan de complicada aplicación en programas complejos de cuantiosas variables, en que no se entienden precisamente las interrelaciones entre éstas.
- **Modelos matemáticos:** este sistema, de carácter suplementario y varias veces opcional a las formas convencionales de producir ciencia, el experimental y el teórico, ha realizado un resistente impacto en, prácticamente, en la totalidad los campos de la ciencia. La finalidad de la simulación computacional es determinar los patrones teóricos en su absoluta complejidad, por medio de la resolución numérica de las ecuaciones comprometidas, produciendo estilo intensivo (y extensivo) de ordenadores.

Un programa puede delimitarse como una serie de objetos o entidades que interrelacionarse entre sí con el fin de lograr un cierto objetivo. Se define como estado de un sistema a la agrupación mínima de variables inevitables a fin de caracterizar o hallar totalmente aquellos aspectos de interés del programa en un algún momento a tiempo. A estas variables se le llama variable de estado. Advirtiendo a la correspondencia en medio la evolución de las propiedades de interés y la variable independiente tiempo, los sistemas se catalogan en:

- ✓ **Sistemas continuos:** las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo.

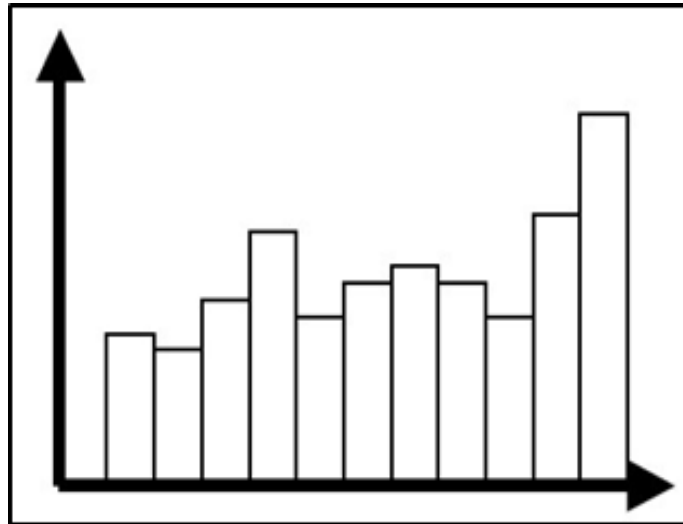


*Figura 21. Ejemplo sistema continuo*



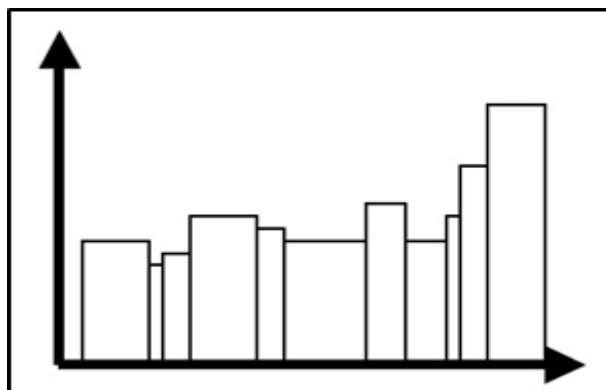
*Figura 22. Evolución de una variable de un sistema continuo*

- ✓ **Sistemas discretos:** se califican porque las características de utilidad del sistema permutan solamente en un cierto instante o en una cadena de instantes, y mantienen constantes el resto del tiempo. La cadena de instantes en las cuales la situación del sistema puede exponer un cambio, someterse normalmente a un patrón constante



*Figura 23: Evolución de una variable de un sistema discreto*

- ✓ **Sistemas orientados a eventos discretos:** idéntico que los sistemas discretos, se califican porque las cualidades de utilidad del sistema permutan únicamente en una cadena de instantes de tiempo, manteniéndose constantes el residuo del tiempo. La cadena de instantes sobre el estado del sistema puede presentar un intercambio, acatando a un patrón aleatorio.



*Figura 24. Evolución de una variable de un sistema orientado a eventos discretos*



- ✓ **Sistemas combinados:** aquello que coordinan subsistemas que acompañan filosofías continuas o discretas, correspondientemente. Es el suceso de los sistemas que disponen componentes que deben ser obligatoriamente modelados, conforme algunos aforismos de enfoques específicos.

#### **2.4.11. Clasificación de modelos**

La presentación de las peculiaridades de utilidad de un sistema se entiende como modelo del sistema, y la transformación de abstracción para alcanzar esta descripción se entiende como modelado.

Encontramos y hay muchos tipos de modelos (físicos, mentales, simbólicos). Para significar los sistemas en análisis utilizaremos modelos simbólicos matemáticos como instrumento para describir las dinámicas de interés de todo sistema en un ambiente de simulación digital.

Los modelos simbólicos matemáticos trazan un mapa de las relaciones existentes en medio de las propiedades físicas del sistema, las que se aspiran modelar en las respectivas estructuras matemáticas. El modelo de formalización matemática que se emplee, se someterá de las cualidades intrínsecas de las dinámicas de interés que se pretenden simbolizar.

La presentación en terminaciones matemáticas de un sistema verdadero no es un procedimiento de trabajo propia de la simulación digital, sino que es connatural a la pluralidad de las técnicas que se emplean para resolver cualquier tipo de problema. Los modelos que pueden surgir son los siguientes:

##### **a) Modelos estáticos frente a modelos dinámicos**

- Los modelos estáticos acostumbran emplearse para significarse el sistema en un verdadero instante de tiempo; por consiguiente, en su planteamiento no se considera el avance del tiempo.

$$\text{STOCK} = \text{Stock inicial} + \text{Material entrada} - \text{Material consumido}$$

- Los modelos dinámicos autorizan deducir cómo las variables de utilidad del sistema en investigación evolucionan con el tiempo.

Evolución del STOCK = Flujo de entrada – Flujo de salida

#### **b) Modelos deterministas respecto a modelos estocásticos**

- Un modelo se designa determinista, si su reciente estado puede ser cumplidamente establecido a partir del estado preliminar y de sus entradas. Dicho de otra manera, promete un exclusivo conjunto de valores de salida para un conjunto de entradas conocidas.
- Los modelos estocásticos pretenden de una o más variables aleatorias a fin de establecer las dinámicas de interés. En conclusión, el modelo no genera un exclusivo conjunto de salidas cuando es empleado a fin de ejecutar un experimento, sino que los rendimientos ayudan a fin de estimar el comportamiento real del sistema.

#### **c) Modelos continuos frente a modelos discretos**

- Los modelos continuos se califican por figurar la evolución de las variables de interés de forma continua. Habitualmente, acostumbran hacer uso en ecuaciones diferenciales ordinarias si se examina sencillamente la transformación de una cualidad en relación al tiempo o bien, ecuaciones en derivadas parciales si se reflexiona igualmente la evolución respecto a otras variables adicionales.
- De manera análoga al concepto de los modelos continuos, los modelos discretos se califican por simbolizar la evolución de las variables de interés de forma discreta.

Educándose hacia la minería, las transformaciones de manufactura son establecidos por una transformación industrial reiterativo, que puede dividirse en periodos probables de optimizar y organizar.

Estas operaciones han evolucionado herramientas de administración de operaciones (*Operations Management Tools*), como la teoría de restricciones (TOC, *Theory of constraints*) y la simulación, que se han interpretado en valiosas mejoras en la productividad.

La minería de hundimiento por bloques o paneles, por otra parte, tienen en su periodo rentables condiciones que pueden confrontarse de buena manera con las transformaciones de producción industrial referidos: entre ambos son de naturaleza reiterativo y se desenvuelven en un área de trabajo determinado.

Consecuentemente es valioso entonces entender, de qué procedimiento pueden emplearse estos instrumentos de administración de operaciones en la minería, a fin así maximizar su productividad y comprender de ideal forma cómo se corresponden las distintas variables que ingresan en este proceso.

Se ha aprendido por medio de simulación, los modelos que representen la excavación y el acarreo en minería superficial y subterráneo, a fin de seleccionar el equipo de perforación y la superior coordinación cargador–transportador tanto en amplitud según modelos y marcas.

Las dimensiones de efectividad seleccionadas son el menor costo por tonelada de material extraído de mina y la máxima producción en la unidad de tiempo. Realmente, son pocos las investigaciones de simulación que han mirado el aspecto geotécnico del macizo rocoso de manera detallada para extraer consideraciones de control, además de la capacidad, la disponibilidad y las limitaciones de los equipos.

## **2.5. Descripción de la Cía. minera Condestable S. A.**

### **2.5.1. Generalidades de la empresa**

En 1961, año en que *Nippon Mining Company*, comienza trabajos de reconocimiento geológico en la mina Condestable. En 1962, se constituye como compañía minera Condestable S. A. y en 1964 se inicia la explotación del yacimiento consiguiendo 600

toneladas por día con 2.50 % de ley de Cu. En 1976, *Nippon Mining Company* dona su participación en Condestable a través del MEM, a cambio de una deuda sobre el tiempo de servicio del personal. En 1977 se realizan los trabajos de desbroce.

En 1976, *Nippon Mining Company* concede su participación en Condestable, a través del Ministerio de Energía y Minas, al gobierno peruano, a cambio de la deuda correspondiente al tiempo de servicios del personal. En 1977, se inician trabajos de desbroce para el minado del tajo abierto Resurrección, de las cajas-puentes y pilares de la antigua explotación por Cámaras y Pilares y, en 1978, se inicia la extracción de mineral del tajo abierto, hasta diciembre de 1997. En 1986, la planta concentradora alcanza 1350 toneladas por día de producción (TPD).

El 26 de mayo de 1992, Condestable llega a ser la primera empresa que es privatizada. En 1995 crece la capacidad de la planta concentradora, llegando un nivel de producción de 1,500 TPD. En enero de 1997, ingresa *Trasfiguro Beheer B.V.* mediante una oferta pública de adquisición (OPA) obtiene el 30.6 % de las acciones.

En ese mismo año mediante aumento de capital, entra como accionista *LG Metals* de Corea, que ahora está representado por *LSIS*, asumiendo el 20 % del capital incrementado y dando un préstamo subordinado de \$3,000,000 para financiar un intenso programa de exploración, que culmina sin resultados significativos a mediados de 1998.

El 31 de enero de 1998 se paralizan las operaciones de producción de la Mina Condestable por falta de reservas de mineral con leyes económicas producto de la significativa caída del precio internacional del cobre.

En el año 1998, específicamente en julio, las operaciones se reinician con un 50 % de su capacidad, con leyes de cabeza de 1.31 % Cu. A su vez, se negocia un contrato de cesión en la *Cía. Minera Pativilca* por los derechos de la cercana mina Raúl, firmado en el mes de octubre de ese año, reiniciando las actividades y la rehabilitación de la mina, que había sido cerrada un año antes por sus propietarios. Finalmente, en marzo de 1999,

se inician las operaciones de minado. Luego, se extiende el contrato a 15 años más de cesión, en enero de 2005.

La empresa comienza un programa de inversiones que conducen a crecer su capacidad de tratamiento por etapas. En el año 2000, crece la capacidad de tratamiento a 1950 TPD. En julio de 2003, el volumen de tratamiento crece a 2800 TPD. En el 2004, comienza el Proyecto de Ampliación, que ha permitido conseguir un nivel de tratamiento a más de 4100 TPD. En el 2007, se amplía la planta, que a partir de enero del 2008 se cumple con la producción de 6000 TPD. En el mes de febrero del 2008 Iberian Mineral Corp., obtiene el 92% del accionariado de Cía. Minera Condestable. (Venegas, 2009).

### **2.5.2. Actividades económicas**

La empresa Corporación de Gestión Minera S.A. (la compañía) es una subsidiaria peruana de Southern Peaks Mining L.P. Se inicia, el 23 de junio de 2013, cuando obtiene el 98.7 % de los derechos de voto de Compañía Minera Condestable S.A.

Condestable tiene como principal actividad el procesamiento y venta de concentrado de cobre, producto de la extracción de sus minas Condestable y Raúl. Asimismo, cuenta con un centro de operaciones ubicado en el distrito de Mala-Cañete, departamento de Lima.

En el año 2014, de acuerdo a un requisito necesario para que inscriba sus acciones en la Bolsa de Valores de Lima (BVL), la junta general de accionistas decidió el cambio de denominación de Sociedad Anónima Cerrada a Sociedad Anónima.

La compañía pertenece al grupo económico Southern Peaks Mining (SPM), quien, en la actualidad, por medio de Southern Peaks Mining LP, el cual tiene más del 99.99 % de sus acciones comunes. El grupo económico SPM cuenta con una sede en Perú y tiene inversiones en corporaciones del sector minero peruano.

De la misma manera, el Grupo SPM está conformado por las siguientes empresas:

a) Southern Peaks Mining S.A.C. El objetivo es dedicarse a la gestión y evaluación de los proyectos del Grupo.

b) Ariana Operaciones Mineras S.A.C. Su objeto social es la exploración desarrollo y explotación de recursos mineros.

c) Minera Tantara S.A.C. Tiene como actividad la exploración de yacimientos mineros.

### **2.5.3. Mineralización**

El cobre compone una parte elemental de todo lo que nos rodea, sus contenidos hacen que sea el material perfecto para trabajar en el avance de tres áreas primordiales para la vida humana: energía sustentable; tecnología; salud y medio ambiente. (7)

En el mes de mayo del 2015, la producción de cobre registró una cantidad de 595,119 TMF (toneladas métricas finas) de concentrados de cobre, volumen que indica sostenibilidad en los planes de minado, al tener una tasa de crecimiento acumulada de 6.29 % en el año. A nivel mensual, comparado año a año se observa un crecimiento de 16.08 % con respecto al mes del año anterior.

La región Ancash, es el líder en la obtención de concentrados ya que aporta el 24.75 % del total nacional (147,284 TMF), registrando una tasa declinante interanual que al mes de mayo fue de -6.02 %. La región Cusco está en segundo lugar, ya que aporta el 15.09 % y con un volumen de extracción de 89,780 TMF; Cusco ha venido registrando el presente año un desempeño de 37.41 %, desplazando a Moquegua (74,877 TMF) aportante del 12.58 %, y a Arequipa (89,780 TMF) aportante del 13.75 % nacional. (8)

Compañía Minera Condestable S.A. es una empresa dedicada al procesamiento y comercialización de concentrados de cobre, el cual es obtenido mediante la explotación de sus yacimientos.

En 1961 Nippon Mining Company inicia trabajos de reconocimiento geológico en Condestable, firmando un contrato de exploración. El 14 de noviembre de 1962, se constituye Compañía Minera Condestable S.A. y en 1964 se inicia la explotación del yacimiento llegando el tratamiento a 600 t/día con 2.50% de ley de Cu.

En 1976, Nippon Mining Company dona su participación en Condestable, a través del Ministerio de Energía y Minas, al gobierno peruano, a cambio de la deuda correspondiente al tiempo de servicios del personal. (9)

En 1977, se inician trabajos de desbroce para el minado del Tajo Abierto “Resurrección”, de las cajas- puentes y pilares de la antigua explotación por Cámaras y Pilares y, en 1978, se inicia la extracción de mineral del tajo abierto, hasta diciembre de 1997. En 1986 la capacidad de la planta concentradora alcanza las 1350 t p/d. (9)

El 26 de mayo de 1992, Compañía Minera Condestable se convierte en la primera empresa privatizada del país. En 1995 se incrementa la capacidad de la Planta Concentradora, alcanzando un nivel de producción de alrededor de 1,500 t p/d. (9)

En enero de 1997, ingresa Trafigura Beheer B.V. Mediante OPA adquiere el 30.6 % de las acciones. Ese mismo año, mediante aumento de capital, ingresa como accionista LG Metals de Corea, hoy representado por LSIS, asumiendo el 20 % del capital incrementado y de Corea, hoy representado por LSIS, asumiendo el 20 % del capital incrementado y realizando un préstamo subordinado de \$3,000,000 con la finalidad de financiar un intenso programa de exploración, que se inicia de inmediato y culmina sin resultados significativos a mediados de 1998. (9)

El 31 de enero de 1998 se paralizan las operaciones de producción de la mina Condestable, por falta de reservas de mineral con leyes económicas producto de la significativa caída del precio internacional del cobre. (9)

En julio de 1998, se reinician las operaciones al 50 % de la capacidad instalada, con mineral de Condestable y con leyes de cabeza de 1.31 % Cu. Paralelamente se negocia un contrato de cesión minera con Cía. Minera Pativilca por los derechos de la colindante mina Raúl, que se firma en el mes de octubre de dicho año, comenzando de inmediato la rehabilitación de la mina, que había sido cerrada un año antes por sus propietarios. Finalmente, en marzo de 1999, se inician las operaciones de minado en dicha concesión. Posteriormente se extiende el contrato de cesión a 15 años y, en enero de 2005, Condestable formaliza la opción que le permite explotar la mina Raúl y denuncios adyacentes hasta febrero de 2014. (9)

Por otro lado, la empresa se embarca en un programa de inversiones conducentes a incrementar su capacidad de tratamiento por etapas.

En marzo de 2000 aumenta la capacidad de tratamiento a 1950 t p/d. En julio de 2003 la capacidad de tratamiento se incrementa a 2800 t p/d. En el 2004, se inicia el proyecto de ampliación, el cual ha permitido alcanzar el nivel de tratamiento por encima de las 4100 t p/d.

En el 2007, se realiza la ampliación de la planta, con esto a partir de enero del 2008 la producción es de 6000 t p/d. En febrero del 2008 Iberian Mineral Corp., adquiere el 92 % de las acciones de Cía. Minera Condestable.

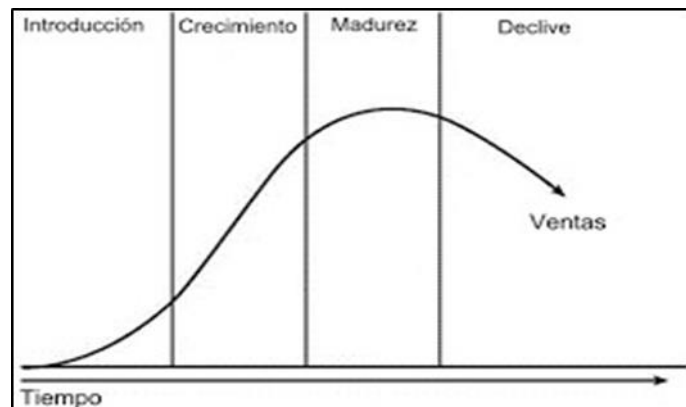
El ciclo de vida del cobre se encuentra en etapa de crecimiento tras la gran producción de cobre de las minas Toromocho y Constancia en el 2015. En el presente año la producción se incrementó debido a la ampliación de Cerro Verde y a la puesta en marcha de la mina Las Bambas. Para el 2017 sucederá lo mismo por la ampliación de Toquepala en Cuzco.

Para el caso de Compañía Minera Condestable S.A. esta tuvo una producción de 19,089 (TMF) el año 2015, 18,225 TMF el año 2014 y 18,431 TMF el año 2013; también ha registrado ampliaciones de planta a lo largo de su historia llegando actualmente a



7000 toneladas por día como capacidad instalada, lo que demuestra que la organización se encuentra en crecimiento.

La etapa de vida de la Compañía Minera Condestable es del Crecimiento tal como se aprecia en la figura 25.



**Figura 25. Ciclo de vida del producto**  
**Tomado de Compañía Minera Condestable S. A.**

Se justifica la etapa de crecimiento de Compañía Minera Condestable S. A. en la tendencia de aumento de sus ventas, en el año 2014 se facturaron \$ 119,870, para el 2015 la empresa facturó \$ 91,058, en el 2016 las ventas volvieron a incrementarse producto de la recuperación del sector y se logró una facturación de \$ 96,795, se proyecta para el cierre del 2017 lograr una facturación de \$103,861.

#### **2.5.4. Ubicación y acceso**

La mina Condestable se encuentra ubicada en el paraje denominado Loma de Vincho, adyacente a la localidad Bujama Altos en el distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima. Se encuentra ubicada a una altitud promedio de 200 msnm, en una pequeña subcuenca, delimitada por una extensa llanura que ingresa como una entrante hasta las primeras estribaciones rocosas.

El acceso a la mina es a través de la carretera Panamericana Sur hasta el Km. 90, desde donde se ingresa hacia el Este, aproximadamente 5 Km.

## 2.6. Geología

### 2.6.1. Geomorfología

Todo el yacimiento está limitado por dos valles: uno al norte, el valle del río Mala, y otro al sur, un valle actualmente seco. Las pendientes de las faldas de los cerros en el área son ligeras a moderadas. Se presentan dos unidades morfológicas descritas a continuación. (ver figura N°26)

- La unidad morfológica “cerros altos de modelado suave” involucra promontorios de altitudes entre 300 y 420 m s. n. m., que corresponden principalmente al área de propagación de las rocas volcánicas, las cuales presentan generalmente relieves o modelados suaves.
- En las intersecciones con las quebradas laterales muestran cortes abruptos, como se observan en las partes altas de las instalaciones de la chancadora y en la parte alta del antiguo *Open Pit* Raúl. Sobre esta unidad actúan los agentes químicos y físicos que provocan la alteración y fracturación de las rocas a profundidades considerables, prevaleciendo el proceso erosivo.
- La unidad morfológica “depresiones con acumulaciones de depósitos cuaternarios” está asociada a los valles relativamente jóvenes como los observados desde el ingreso a las instalaciones de la mina, los cuales presentan relieves ondulados en su base, donde se acumula considerable cantidad de detritos de diverso origen; estos valles fueron labrados siguiendo probablemente lineamientos geológicos estructurales.

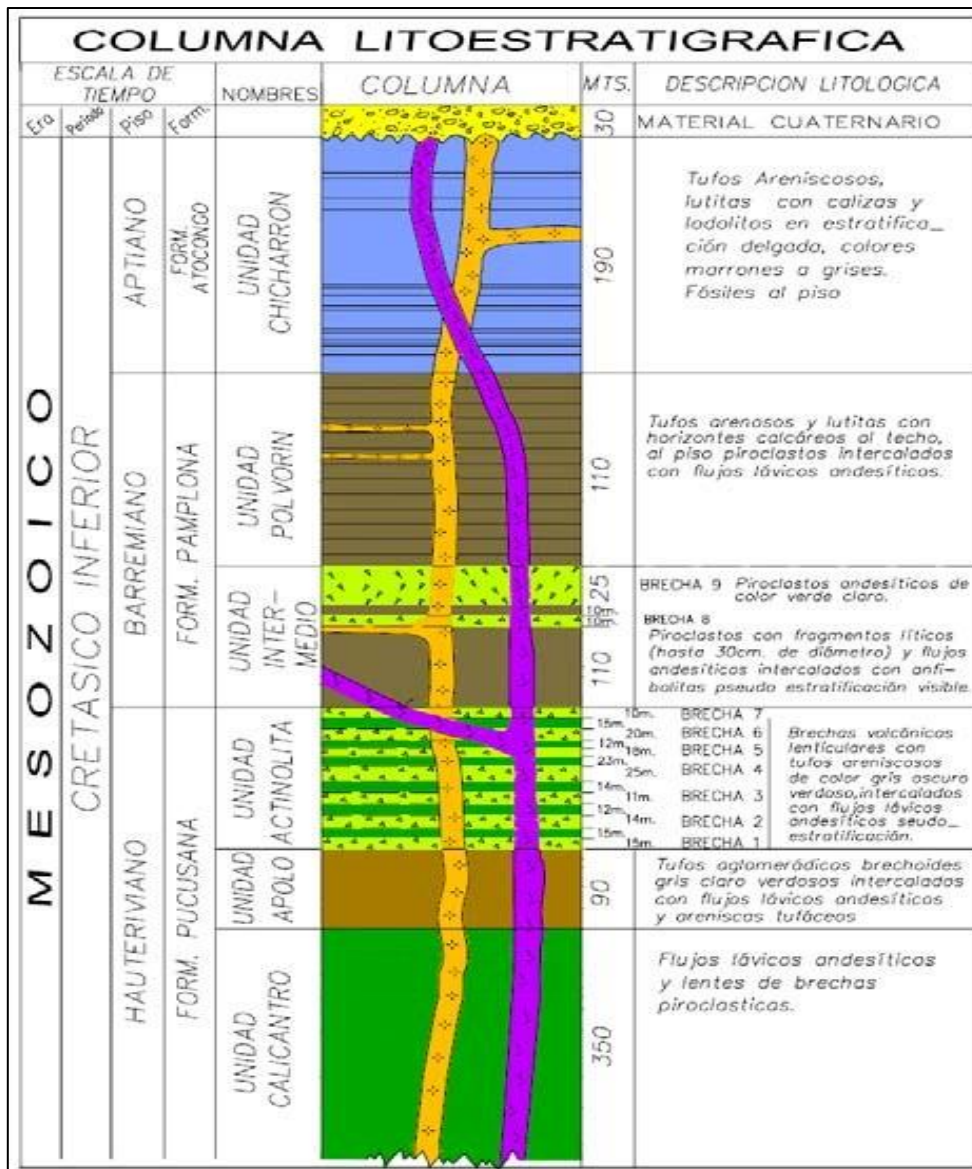


**Figura 26. Fotografía de vista del relieve en el área de emplazamiento de la mina Raúl. Se observan las unidades morfológicas "Cerros altos de modelado suave" y "Depresiones con depósitos cuaternarios".**

### **2.6.2. Unidades litológicas**

En el área de emplazamiento de la unidad minera Condestable se observa la presencia de rocas volcánicas sedimentarias, localizándose hacia el piso a la formación Asia sobre la cual se encuentra el grupo Morro Solar y las formaciones Pucusana, Pamplona, Atocongo y Chilca, cuyas edades van del Jurásico superior al Cretácico inferior. Estas unidades volcánico-sedimentarias han sido intruidas por el Batolito de la Costa.

En la unidad minera la secuencia estratigráfica ha sido dividida en seis unidades litológicas, que muestran cambios laterales de facies cortadas por un stock de pórfido andesítico-dacítico y diques de diabasa, asociados al Batolito de la Costa Peruana (ver figura 27).



**Figura 27. Columna estratigráfica de la unidad minera Condestable  
Tomada de Cía. Minera Condestable**

Según la secuencia estratigráfica, las unidades Calicantro, Apolo y Actinolita pertenecen a la formación Pucusana; las unidades Intermedio y Polvorín pertenecen a la formación Pamplona y la unidad Chicharrón a la formación Atocongo.

La unidad Calicantro correlaciona en la parte inferior en forma concordante y continua con el grupo Morro Solar y constituye la parte inferior de la formación Pucusana. Consiste de lavas andesíticas porfíricas con estratificación gruesa y aisladas

intercalaciones de aglomerados andesíticos masivos de color verde oscuro y matriz afanítica. Potencia mayor de 430 m.

En esta unidad la mineralización es diseminada y bandeada, con rellenos en las porosidades de las brechas piroclásticas con minerales de calcopirita, pirita y pirrotita. La unidad Apolo es la unidad intermedia de la formación Pucusana, concordante con las unidades inferiores y superiores, su contacto es transicional y continuo. Presenta notorio incremento de sedimentos (calizas, margas, areniscas y grauwacas), con estratificación delgada, desarrollo de anfibolita y ocasionales intercalaciones de piroclásticos en proporción que aumenta hacia el NE del yacimiento. En la parte alta de la sección predominan areniscas tufáceas en bancos gruesos. Potencia estimada de 90 m.

La mineralización es diseminada y bandeada conteniendo calcopirita y pirita, en los tufos aglomerádicos brechoides, donde la caja piso y techo esta intercalada por flujos lávicos andesíticos y areniscas tufáceas.

La unidad Actinolita conforma la parte superior de la formación Pucusana y es concordante y correlaciona con la formación Pamplona en la parte superior. Su potencia estimada es de 180–200 m. Está constituida mayormente por andesitas gris verdoso y verde oscuro de textura porfirítica con intercalaciones lenticulares de brechas volcánicas, con desarrollo de cristales aciculares de actinolita (ver fotografía N°2). Se han reconocido seis horizontes de brechas con potencias variadas de 10 a 25 m, intercaladas con tufos areniscosos de color gris oscuro verdoso y flujos lávicos andesíticos con una pseudo estratificación y espesores que varían de 12 a 23 m.

La mineralización se presenta en forma diseminada y relleno en las porosidades de las brechas, con contenidos de calcopirita, pirita, pirrotita, sulfuros reemplazando a los anfíboles.

La unidad Intermedio conforma la parte inferior de la formación Pamplona, en su base correlaciona con la formación Pucusana y en el tope está en contacto en forma concordante con la unidad Polvorín. Potencia estimada 130 m. Está conformada por

piroclásticos líticos, lavas andesíticas afaníticas algunas veces con fenocristales de hornblenda, e intercalaciones con lutitas y horizontes calcáreos gris negruzcos, chert crema sucio que sirven de horizontes guías, grauwacas y tobas volcánicas en capas delgadas. La estratificación es delgada en las lutitas.

La mineralización se presenta principalmente en la matriz de las brechas y en los tufos aglomerádicos y de grano fino a medio, generalmente en forma de pseudo estratificación. Su composición mineralógica consiste de calcopirita y pirita diseminadas y estratificadas.

La unidad Polvorín es la unidad superior de la formación Pamplona y correlaciona en su tope con la formación Atocongo concordantemente. Potencia estimada 135 m. Está compuesta por bancos gruesos de lavas andesíticas verde oscuro a negruzco y textura afanítica, la andesita se presenta alterada a clorita y calcita. Intercalaciones de piroclásticos, horizontes calcáreos, lutitas y grauwacas de tonos marrones que se reconocen en su sección superior. En la parte inferior se reconoce un horizonte de brechas piroclásticas con un espesor de aproximadamente de 25 m.

La mineralización consiste en mantos y diseminaciones de calcopirita, pirita y pirrotita, donde los tufos arenosos y lutitas con horizontes calcáreos conforman el techo y los piroclásticos intercalados con flujos lávicos andesíticos conforman el piso.

La unidad Chicharrón representa a la formación Atocongo y geológicamente sufre una discordancia con las otras formaciones superiores, lo que pone en evidencia que sufre una fuerte erosión y movimiento tectónico por el Batolito de la Costa y que luego se deposita el material cuaternario antiguo. Está conformado por tufos areniscosos, lutitas con calizas y lodolitas en estratificaciones delgadas, areniscas, tobas. El conjunto tiene coloración marrón a gris. Potencia estimada de 190 m. La mineralización consiste en mantos definidos con minerales de calcopirita, pirita, magnetita, pirrotita, hematita y los sulfuros remplazando a los anfíbole.

Las rocas intrusivas provienen de diques y sills de pórfidos andesíticos – dacíticos con rumbo NW y NE de forma irregular en toda su extensión, cortan a todas las unidades anteriormente descritas produciendo una estrecha zona de metamorfismo. Por tectonismo, muchos de sus contactos se presentan fallados, su mayor potencia alcanza hasta 35 m.

Por otro lado, también se presentan diques doleríticos con rumbo NNE y NW y buzamientos subverticales, estos tienen forma alargada con espesores de hasta 15 m., estas son las estructuras más recientes.

La distribución de las unidades litológicas se presenta en la sección transversal Vinchos Sur, actualizada por la Superintendencia de Geología y Exploración de la Compañía Minera Condestable en abril del 2015 (ver figura Anexo N°1).



**Figura 28. Fotografía de vista de afloramientos de tufos y lavas volcánicas de composición andesítica pertenecientes a la unidad Actinolita (techo de la formación Pucusana) en las inmediaciones de la bocamina Wilcox**

### **2.6.3. Condiciones estructurales**

En el área de estudio, las unidades litológicas presentan un rumbo promedio N20°-30°W con buzamiento entre 30° a 45° SW, observándose ocasionalmente pliegues de

algunas decenas de centímetros al techo de la unidad Chicharrón por su cercanía al potente *sills* de pórfido andesítico - dacíticos.

La secuencia volcánico- sedimentaria está afectada por dos importantes sistemas de fallas locales:

- Sistema de fallas de rumbo NNE con buzamientos de 75° a 90° SE
- Sistema de fallas de rumbo NNW con buzamientos de 60° a 90° NE

En el área de estudio se ha determinado como fallas principales las que presentan orientación N40°E/75°SE, así como fallas locales que presentan orientaciones: N45°-60°W/45°-50°NE, N50°E/85°SE y N75°E/80°SE.

Asimismo, la orientación de la veta falla Norte está asociado con el sistema de falla de orientación N60°W/60°-70°NE y la falla Calicanto está asociado con los sistemas principales de discontinuidades (ver figura 32).

La dirección de los esfuerzos compresivos predominantes es de EW, por lo que las fallas predominantes corresponderían a fallas de cizallamiento o corte con desplazamientos predominantemente horizontales.

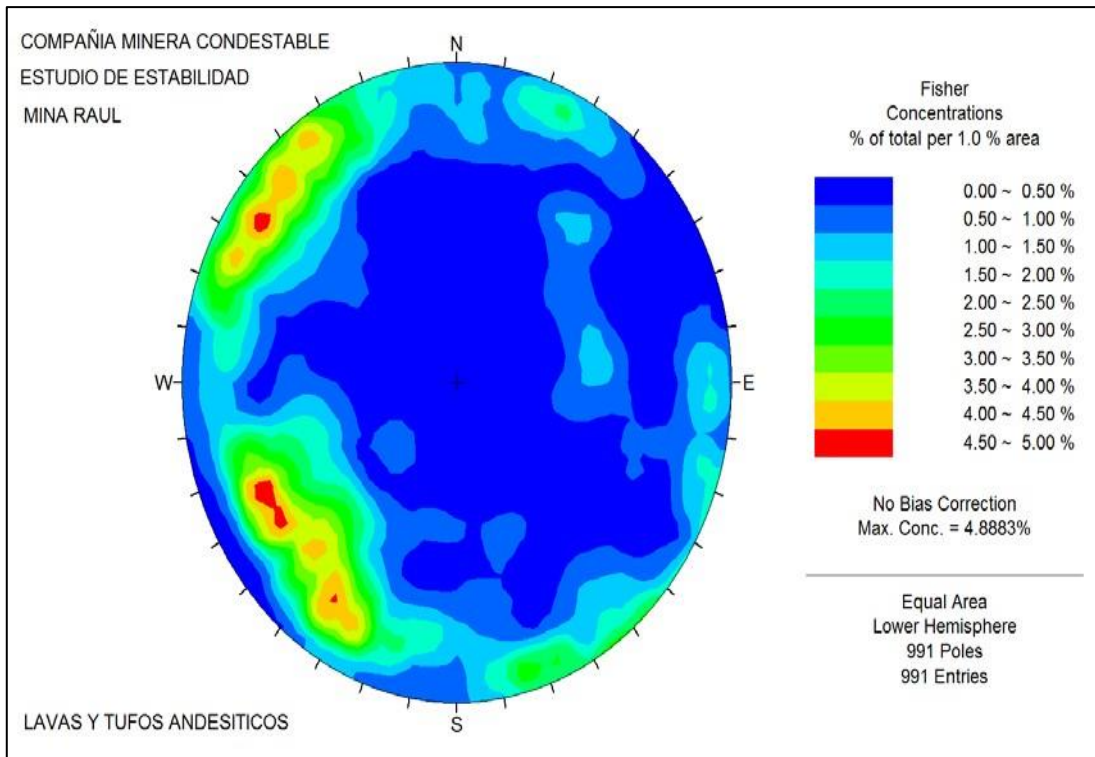
De acuerdo a los registros lineales de medición de discontinuidades realizados durante los estudios (25 registros con 991 polos) se determinó dos familias de discontinuidades principales (ver fotografía N°3) y un sistema de discontinuidad ocasional, así como la Pseudo-estratificación ocasional cuyas orientaciones son las siguientes (ver figuras 30 y 31):

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| N30°-50°W/60°- 70°NE | (Sistema principal)      |
| N30°-50°E/70°- 80°SE | (Sistema principal)      |
| N65°-75°W/75°-85°SW  | (Sistema ocasional)      |
| N05°-15°W/40°-45°SW  | (Pseudo-estratificación) |

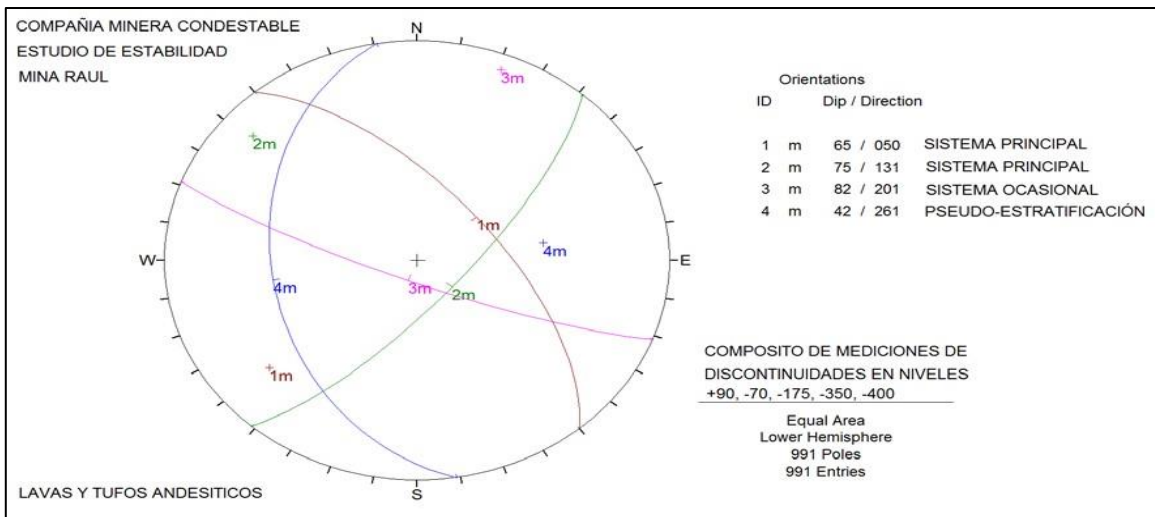




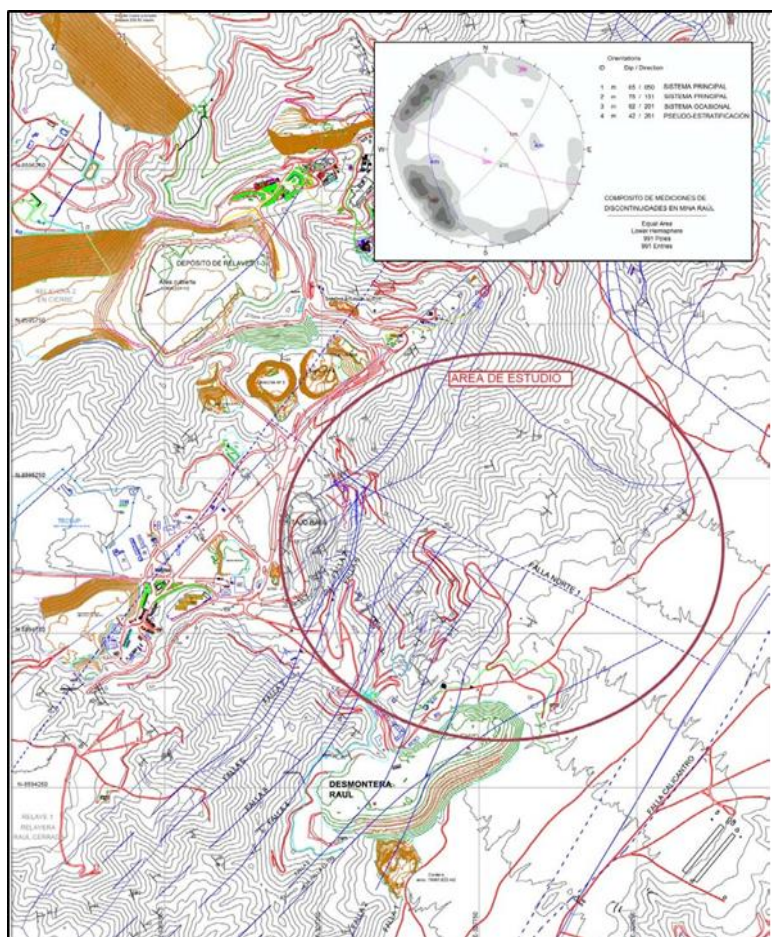
**Figura 29. Fotografía de vista de los principales sistemas de fracturas en el cruceo XC-4375, mina Raúl**



**Figura 30. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades en las minas Condestable y Raúl**



**Figura 31. Proyección estereográfica de los principales sistemas de discontinuidades en la mina Raúl**

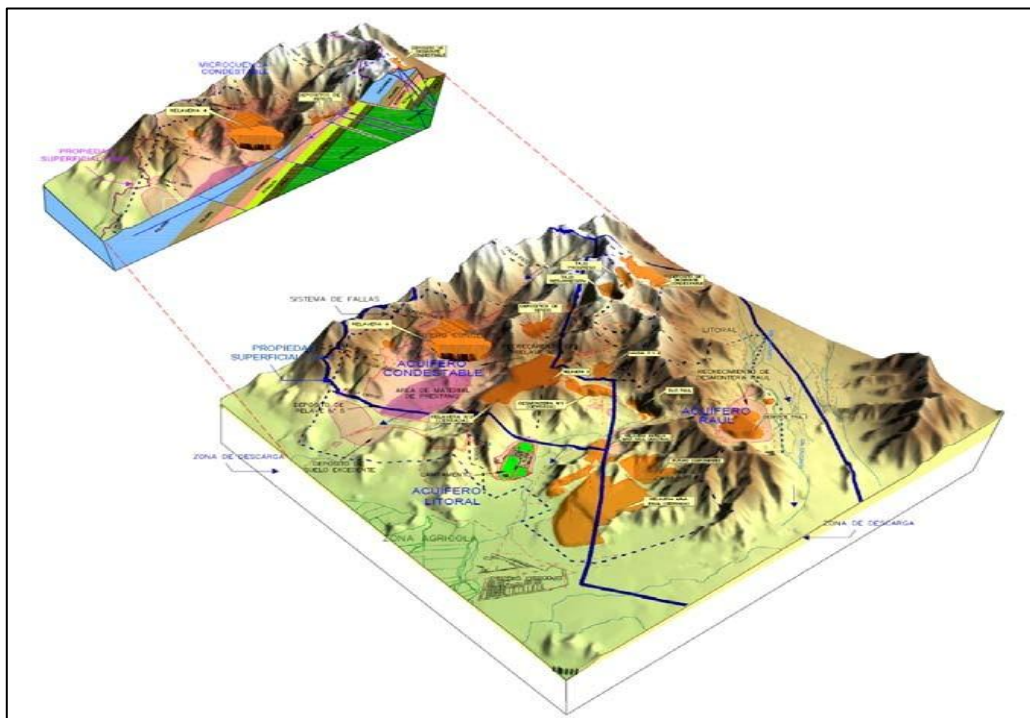


**Figura 32. Representación de las fallas principales (color azul) y de los principales sistemas de fracturas en el área de la mina Raúl (Plano proporcionado por CMC, 2016)**

Se observa la proyección estereográfica de las mediciones de discontinuidades en el área de estudio.

#### 2.6.4. Condiciones hidrogeológicas

La disposición estructural de los estratos afectados por fallamiento e intrusión de roca porfírica andesítica e intrusiones granodioríticas como resultado del tectonismo regional ocurrido en el área de estudio, así como la calidad de agua subterránea nos ha permitido establecer que estaríamos frente a tres acuíferos en medio fracturado: acuífero litoral, acuífero Condestable y acuífero Raúl. Así mismo estos dos últimos se encuentran actualmente en régimen no influenciado ya que no reciben recarga por precipitación ni curso de agua superficial (ver figura 33).



**Figura 33. Modelo hidrogeológico de la unidad minera Condestable según la actualización del estudio hidrogeológico a nivel de detalle realizado por HGS Perú S.A (junio 2013)**

Los ensayos de permeabilidad en sondajes diamantinos realizados durante la actualización del estudio hidrogeológico dieron como resultados permeabilidades entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$ , por lo que las filtraciones en interior mina serán muy escasas, salvo en zonas de intersección de fallas que crucen estructuras mineralizadas, lo cual durante

el estudio de estabilidad Geomecánica integral no se ha observado flujos de agua ni goteos procedentes de agua subterráneas, únicamente se ha observado goteos procedentes del agua utilizado para las actividades de perforación.

#### **2.6.5. Geología del yacimiento**

La mineralización, principalmente de cobre y fierro, se encuentra en forma de vetas, mantos por reemplazamiento de capas calcáreas, así como disseminaciones y rellenos de porosidad en brechas volcánicas y tufostratificados. Estas estructuras se encuentran mineralizadas con calcopirita, bornita, pirita, pirrotita, magnetita, hematita, escapolita, calcita, cuarzo y anfíboles; localmente se observa la presencia de molybdenita, esfalerita y galena. Los minerales económicos son la calcopirita y la bornita y como subproductos de los concentrados el oro y la plata.

Los mantos ocurren principalmente en las unidades Chicharrón y Apolo, con potencias de hasta 6 m., su continuidad es interrumpida por fallas e intrusiones de pórfido andesítico-dacítico y diabasa.

Los disseminados ocurren en las unidades Apolo, Polvorín e Intermedio y ocasionalmente en el pórfido dacítico. Algunas veces constituyen grandes cuerpos de forma irregular.

Las brechas se presentan en las unidades Actinolita y el techo de Intermedio y tienen forma y dimensión variada. Las vetas generalmente son transversales a los mantos y tienen buzamientos subverticales. El relleno mineral es de tipo rosario.

#### **2.7. Método del minado**

El diseño y selección de un método de minado requiere de un enfoque sistemático; algunos de los parámetros fundamentales que influyen en el proceso de planificación y diseño son el tamaño y forma de las estructuras mineralizadas de un yacimiento. La resistencia del mineral y de las rocas encajonantes, así como el aspecto económico de la producción.

La mina Raúl tiene zonas de explotación antiguas entre los niveles 200 al -180 que fueron explotados hasta el año 2000. A partir del año 2000 se inició la explotación de zonas mineralizadas hasta el nivel -350 y a partir del año 2015 se viene explotando principalmente cuerpos mineralizados entre los niveles -350 a -450.

Los métodos de minado que se aplica en mina Condestable son principalmente el método de explotación con taladros largos por subniveles (*sublevel open stoping*), el *Shirinkage stoping* y cámaras y pilares (*Room and pillar*).

El método Shirinkage es un método de explotación vertical aplicable a vetas (estructuras verticales), principalmente para explotaciones menores. Consiste en utilizar el mineral quebrado como piso de trabajo para seguir explotando de manera ascendente. Este mineral provee además soporte adicional de las paredes hasta que el caserón se completa y queda listo para el vaciado. Los tajeos se explotan esponja y dejando hasta el momento del vaciado el resto (65 %).

Es un método intensivo en mano de obra, difícil de mecanizar. Se aplica generalmente a vetas angostas de 1.2 a 30 m o a cuerpos donde otros métodos son técnica o económicamente inviables.

Para asegurar que el mineral fluya (que no se “cuelgue”), el mineral no debe tener muchas arcillas, ni debe oxidarse rápidamente, generando cementación. El cuerpo mineralizado debe ser continuo para evitar la dilución. El estéril debe extraerse como dilución o dejarse como pilares aleatorios (que no impidan el flujo). Condiciones de aplicación

Este método de explotación es aplicable en cuerpos tabulares verticales o subverticales angostos o de poco espesor (1 a 10 m), con bordes o límites regulares. Su inclinación debe ser superior al ángulo de reposo del material quebrado, vale decir, mayor a 55°. La roca mineralizada debe ser estable y competente. La roca encajadora (paredes) debe presentar también buenas condiciones de estabilidad.

Principios consiste en excavar el mineral por tajadas horizontales en una secuencia ascendente (realce) partiendo de la base del caserón. Una proporción del mineral quebrado, equivalente al aumento de volumen o esponjamiento (30 a 40 %), es extraída continuamente por la base.

El resto queda almacenado en el tajeo, de modo de servir como piso de trabajo para la operación de arranque (perforación y voladura) como así mismo de soporte de las paredes del tajeo. Cuando el proceso de arranque alcanza el límite preestablecido superior del tajeo, cesan las operaciones de perforación y voladura, y se inicia el vaciado del tajeo extrayendo el mineral que ha permanecido almacenado (60 a 70 %).

En mina Condestable, el Shrinkage es aplicado en vetas donde las potencias varían de 1.0 a 5.0 m. La longitud de los tajeos es de 100.0 m en la dirección del rumbo de la veta y se divide en dos bloques de 50.0 m cada uno, dejando en algunos casos un pilar central. La altura de los tajeos es de 30.0 m con puentes de 4.0 a 5.0 m de altura. La limpieza se realiza a través de ventanas mediante el uso de scoops, no se sostiene ni se rellena.

El método con taladros largos por subniveles está diseñado para extraer yacimientos competentes grandes, masivos o tabulares, a menudo con buzamiento empinado, rodeados de rocas huéspedes competentes, que en general tienen pocas restricciones respecto a la forma, tamaño y continuidad de la mineralización

El éxito del método descansa en la estabilidad de los muros y techos grandes de tajeos (mayormente sin reforzar), así como en la estabilidad de cualquier masa de relleno expuesta. En macizos rocosos de buena calidad, los tajeos abiertos pueden ser excavaciones relativamente grandes, en las cuales la perforación y voladura en anillo es el método principal de rotura de roca.

En los límites del tajeo puede haber dilución de mineral consistente en materiales de baja ley, roca estéril o relleno de mina. Además, también puede haber pérdida de mineral debido a rotura insuficiente dentro de los límites del tajeo.

Dos configuraciones de tajeo básicas son posibles: longitudinal y transversal. En ambas configuraciones, el mineral se explota desde subniveles mediante alguna forma de banqueo y fluye por gravedad a un punto de recolección.

El tajeo por subnivel longitudinal se utiliza para yacimientos comparativamente angostos, usualmente menos de 15 m, con buzamiento empinado y el tajeo paralelo al rumbo del yacimiento.

En yacimientos gruesos, los tajeos se orientan perpendiculares (transversales) al rumbo del depósito con pilares que se dejan entre los tajeos primarios. La recuperación total del tajeo y pilares requiere el empleo de relleno consolidado.

El método se aplica ampliamente en todo el mundo y ofrece varias ventajas, incluyendo el bajo costo y las operaciones de producción eficiente sin ingreso. Utiliza equipo móvil de producción de perforación y carga altamente mecanizado para lograr altas tasas de producción con un nivel mínimo de personal.

Además, las operaciones de producción de perforación en anillo, voladura, y recolección con pala neumática se concentran en unos pocos lugares. Las desventajas incluyen el requerimiento de un nivel importante de infraestructura de desarrollo antes de que empiece la producción, incurriendo así en una alta inversión inicial de capital. Sin embargo, gran parte del desarrollo ocurre dentro del yacimiento. También, los tajeos deben diseñarse con límites regulares, y los bolsones de desecho internos no pueden separarse dentro del mineral roto. De modo similar, el mineral delineado no puede recuperarse más allá de un límite de tajeo diseñado.

En mina Condestable, el método de minado de tajeos por subniveles se aplica a los cuerpos mineralizados de grandes dimensiones con longitudes hasta 100.0 m., potencias



del orden de 30.0 m. y alturas entre 40 a 70 m. con perforaciones en abanico, a partir de los niveles de preparación. Los diámetros de taladros utilizados son de 2.5" con longitudes hasta de 20.0 m., pudiéndose lograr las aberturas en el integro de los cuerpos sin el uso de sostenimiento, según el método grafico de estabilidad.

Sin embargo, se recomienda que toda abertura con encampane mayor a 600 m. requerirá posteriormente de relleno de desmonte para evitar la presencia de lajamientos en las paredes por efectos de las presiones verticales.



## CAPÍTULO III

### MÉTODO

#### 3.1. Antecedentes de la mina

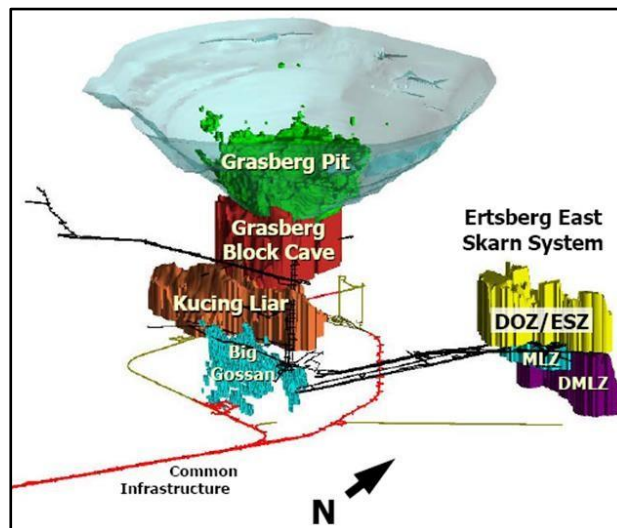
El presente análisis y estudio se realizará con la información histórica recopilada de la mina DOZ PT Freeport Indonesia, la cual se encuentra en la mitad occidental de la isla de Nueva Guinea. (figura 34)



*Figura 34. Ubicación PT Freeport Indonesia*

El distrito minero de Grasberg es uno de los complejos mineros más grandes del mundo en cobre y oro, la que contiene la mayor reserva recuperable de cobre y la mayor reserva de oro.

Dos minas se encuentran actualmente en operación en el distrito: la mina Grasberg a cielo abierto y la mina Deep Ore Zone (DOZ), la cual se explota por método panel Caving mecanizado. En la figura 35, se aprecia el cuerpo mineralizado DOZ, adyacente al cuerpo *Ertsberg Stockwork Zone* (ESZ), que están siendo explotados juntos después de la reciente expansión, con la que se planifica extraer 80.000 t p/d (marzo 2009).

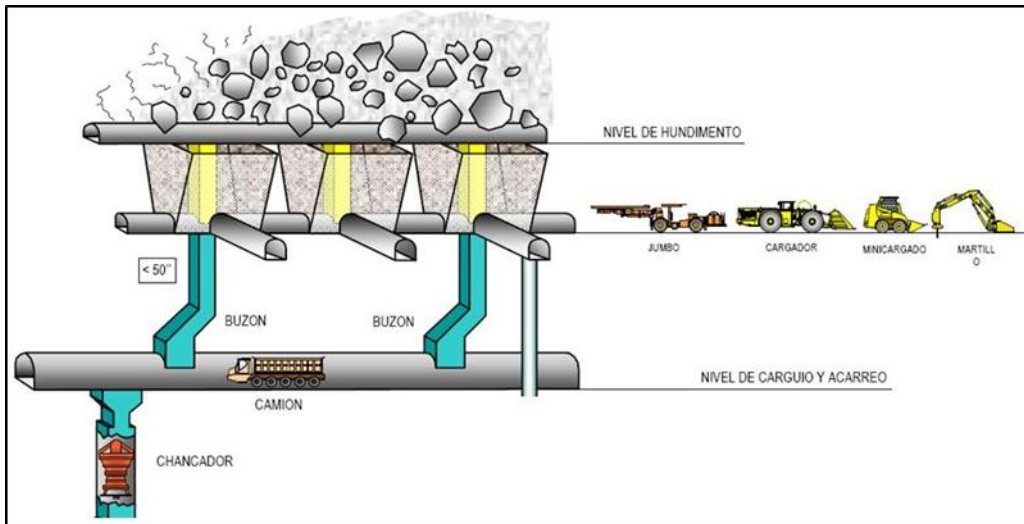


**Figura 35. Cuerpos mineralizados distrito minero de Grasberg**

La infraestructura de la mina DOZ está definida por tres niveles principales:

- Nivel de hundimiento
- Nivel de producción
- Nivel de transporte (carguío y acarreo)

Estos se aprecian de manera clara en la figura 36 y en los capítulos posteriores, donde se realizará un análisis más profundo de los niveles de producción y transporte.

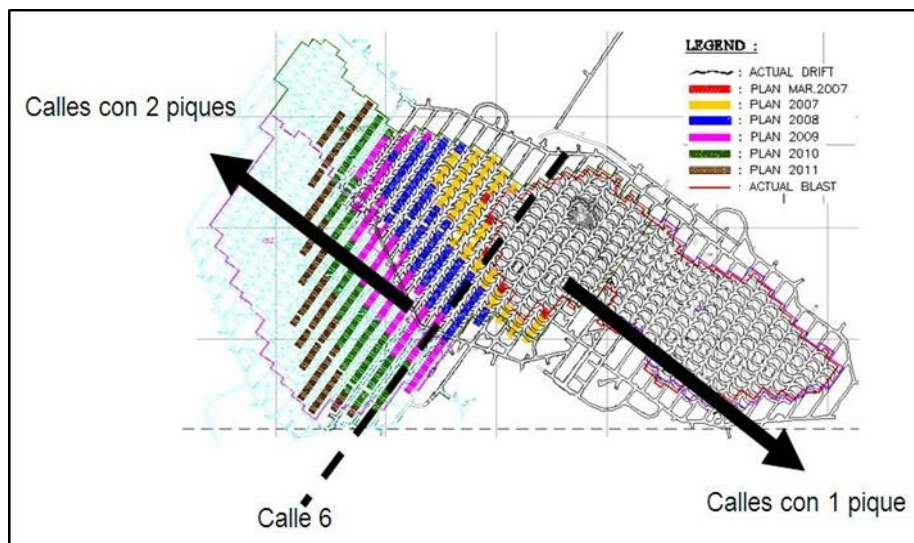


**Figura 36. Esquema manejo de minerales DOZ**

## 3.2. Infraestructura mina

### 3.2.1. Nivel de producción

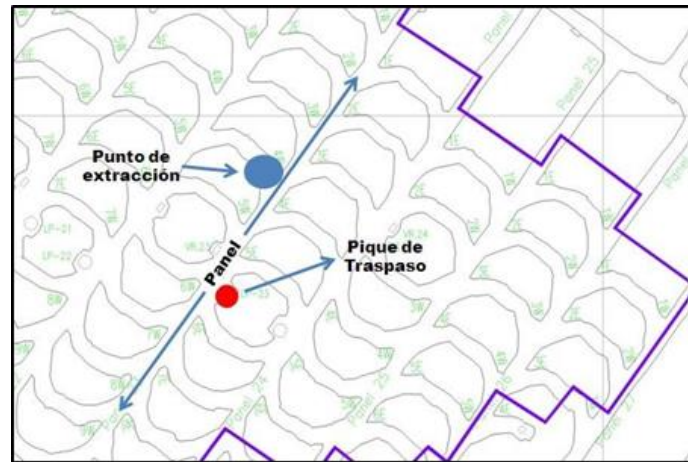
Se aprecia en la figura 37 el nivel de producción de la mina DOZ, además del programa de apertura de puntos (leyenda) para cada período hasta el año 2011.



**Figura 37. Plano nivel de producción DOZ  
Tomado de mina Condestable S.A.**

Al realizar un zoom a la Figura 37, se puede visualizar la relación existente entre los puntos de extracción – panel de producción – pique de traspaso, la cual es fundamental a la hora de la modelación de la mina, la que posteriormente será utilizado en la

construcción del modelo de confiabilidad. Lo anteriormente mencionado se aprecia claramente en la figura 38.



**Figura 38. Zoom plano nivel de producción mina DOZ  
Tomado de DOZ**

### 3.2.2. Nivel y subniveles de transporte

El nivel de producción está conectado por los piques de traspaso con el nivel de transporte, en este el mineral contenido en los piques, cuyo flujo es regulado por buzones, es cargado a camiones, los que transportan el mineral al chancador. Se aprecia en la figura 39, la configuración del nivel de transporte.



**Figura 39. Plano nivel de transporte DOZ  
Tomado de DOZ**

### 3.2.3. Análisis históricos de producción

La importancia que entrega la información histórica es fundamental para conocer el estado de madurez que presentan los componentes del sistema minero (puntos de extracción, calles, piques de traspaso). A continuación, se presenta la información recopilada para cada componente en los períodos 2000 – 2005.

**Tabla 2. Número de componentes activos periodo 2000 – 2006**

| Componente            | Número |
|-----------------------|--------|
| Punto de extracción   | 1333   |
| Cruzado de transporte | 25     |
| Pique de traspaso     | 25     |
| Cruzado de producción | 2      |

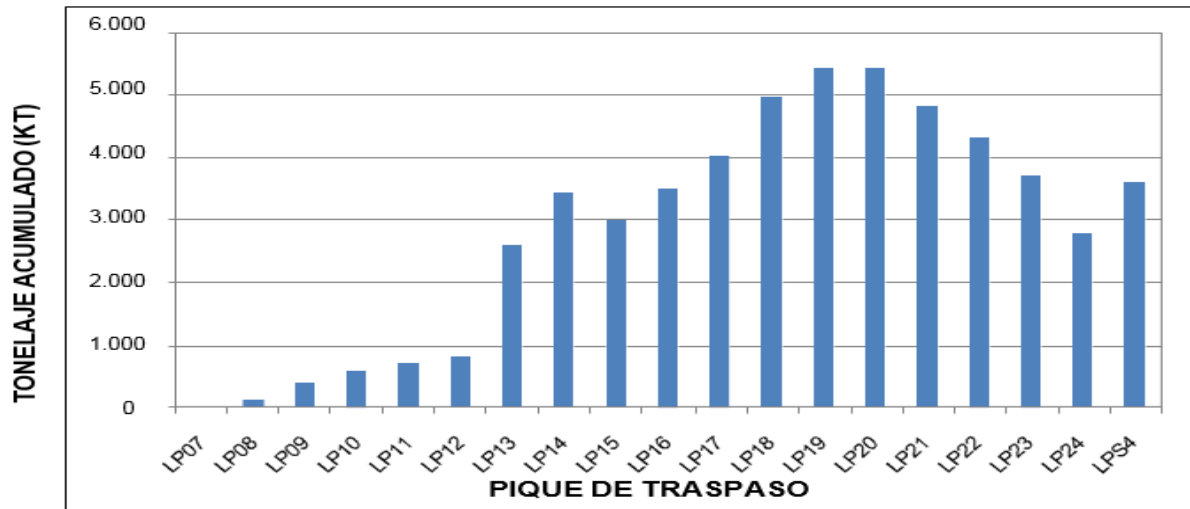
### 3.2.3. Producción mina

La información histórica disponible contiene los tonelajes y el número de eventos de cada punto de extracción, la que está agrupada de manera mensual desde el año 2000 hasta el año 2005, de acuerdo a como se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3. Formato información histórica puntos de extracción**

| Punto extracción | Tonelaje (t) | Mes | Año  | Evento (#) |
|------------------|--------------|-----|------|------------|
| P15-05E          | 44,160       | 5   | 2004 | 0          |
| P15-05E          | 27,002       | 4   | 2004 | 0          |
| P16-01W          | 26,632       | 11  | 2001 | 0          |
| P14-06W          | 22,389       | 5   | 2001 | 0          |
| P14-11E          | 21,506       | 5   | 2002 | 0          |
| P15-05W          | 18,900       | 7   | 2001 | 2          |

Luego con la información disponible, se obtiene el tonelaje acumulado que ha sido vaciado a los piques de traspaso, hasta el año 2005 (figura 40), siendo estos resultados sumamente relevantes para los análisis posteriores.



**Figura 40. Tonelaje acumulado vs Pique de traspaso**  
Tomado de minera Condestable S.A.

Se aprecia en el gráfico anterior que existen dos tendencias claramente marcadas:

- Un primer grupo (LP07 – LP12), presenta tonelajes acumulados menores a 1.000 Kt.
- Un segundo grupo (LP13 – LPS4) presenta tonelajes acumulados mayores que el primer grupo, los cuales fluctúan entre 3.000 – 5.000 Kt.

El desafío actual para DOZ el lograr una producción de 80 Ktpd, el cual se pretende lograr con la integración de nuevos puntos de extracción y por sobre todo con un nuevo cruzado de transporte.

### 3.3. Análisis información piques de traspaso

La base de datos del estado de piques de traspaso analizada contiene información relativa al estado operacional en el periodo que va desde el 1 de enero de 2006 hasta el 31 de diciembre del 2006. El resultado de la recopilación de la información de interferencias operacionales se almacena en una sola tabla, la que se presenta a continuación:



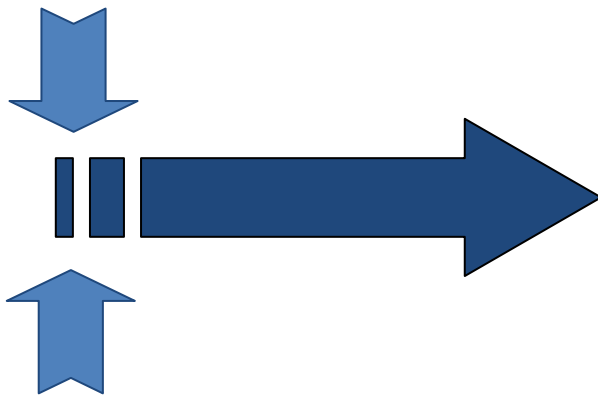
**Tabla 4. Formato final de la información de piques de traspaso**

| Hour | Day | Month | Shift | DMT  | VMT  | LHD  | Truck | LP#5 | LP#6 | LP#7 | LP#8 | LP#9 | LP#10 | LP#11 | LP#12 | LP#13 | LP#16 | LP#17 | LP#18 | LP#19 | LP#20 | LP#21 | LP#22 | LP#23 | LP#24 |
|------|-----|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 19   | 1   | 1     | Swing | 2750 | 3521 | 3040 | 2800  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 20   | 1   | 1     | Swing | 2300 | 2464 | 1198 | 2350  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 21   | 1   | 1     | Swing | 550  | 362  | 678  | 550   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 22   | 1   | 1     | Swing | 2850 | 2423 | 2565 | 2800  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 23   | 1   | 1     | Swing | 2850 | 2810 | 497  | 2850  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 24   | 1   | 1     | Swing | 200  | 650  | 0    | 200   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 1    | 2   | 1     | Nigth | 1400 | 1500 | 938  | 1450  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 2    | 2   | 1     | Nigth | 2250 | 2180 | 3639 | 2300  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 3    | 2   | 1     | Nigth | 2000 | 2000 | 2147 | 2050  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 4    | 2   | 1     | Nigth | 1850 | 1920 | 1672 | 1850  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 5    | 2   | 1     | Nigth | 300  | 110  | 394  | 300   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 6    | 2   | 1     | Nigth | 2450 | 2280 | 2305 | 2450  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 7    | 2   | 1     | Nigth | 2750 | 2400 | 1774 | 2800  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 8    | 2   | 1     | Nigth | 1950 | 1990 | 554  | 2000  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 9    | 2   | 1     | Day   | 229  | 240  | 870  | 500   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    | OK    |

**Tomado de minería Condestable**

La tabla anterior entrega el estado por hora de cada pique operativo durante el año 2006. Además, se cuenta con la información de todos los ciclos pique – chancador realizados por la flota de camiones en el nivel de transporte durante el año 2006, obteniéndose la producción década pique para el año 2006. Finalmente, pueden cruzarse las tablas con el fin de obtener los registros de tonelaje, acumulado, número y tipo de interferencia operacional, agrupados de manera mensual para cada pique de traspaso. La siguiente imagen es representativa de lo especificado anteriormente.

| Hour | Day | Month | Shift | DMT  | VMT  | LHD  | Truck | LP#5 | LP#6 | LP#7 | LP#8 | LP#9 | LP#10 | LP#11 | LP#12 | LP#13 |
|------|-----|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 10   | 1   | 1     | Day   | 1394 | 1460 | 2023 | 2050  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 11   | 1   | 1     | Day   | 2808 | 2940 | 2884 | 3400  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 12   | 1   | 1     | Day   | 2836 | 2970 | 1345 | 2550  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 13   | 1   | 1     | Day   | 1060 | 1110 | 497  | 550   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 14   | 1   | 1     | Day   | 2531 | 2650 | 2644 | 3100  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 15   | 1   | 1     | Day   | 2789 | 2920 | 1164 | 3200  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 16   | 1   | 1     | Day   | 2559 | 2680 | 170  | 1750  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 17   | 1   | 1     | Swing | 1700 | 1390 | 2531 | 1700  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 18   | 1   | 1     | Swing | 2900 | 2129 | 3062 | 2900  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 19   | 1   | 1     | Swing | 2750 | 3521 | 3040 | 2900  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 20   | 1   | 1     | Swing | 2300 | 2464 | 1198 | 2350  |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |
| 21   | 1   | 1     | Swing | 550  | 362  | 678  | 550   |      |      | OK   | OK   | OK   | OK    | OK    | OK    | OK    |



| LP   | HC  | Ton Acum  | 1       | 2       | 3       |
|------|-----|-----------|---------|---------|---------|
| LP05 | HC2 |           |         |         |         |
| LP06 | HC2 |           |         |         |         |
| LP07 | HC2 | 19,629    | 17,820  | 3,410   | 24,365  |
| LP08 | HC2 | 110,824   | 37,730  | 31,955  | 53,515  |
| LP09 | HC2 | 333,948   | 41,195  | 41,745  | 61,160  |
| LP10 | HC2 | 500,395   | 101,695 | 81,510  | 136,620 |
| LP11 | HC2 | 625,376   | 25,355  | 103,015 | 137,555 |
| LP12 | HC2 | 782,019   | 94,380  | 68,145  | 88,880  |
| LP18 | HC1 | 4,917,745 | 108,900 | 107,195 | 107,360 |
| LP19 | HC1 | 5,347,340 | 132,385 | 112,585 | 106,645 |

| TRUCK | LOADS | LP   | Travel | Dumping | Empty | Time | Date | Code | Tonnage |
|-------|-------|------|--------|---------|-------|------|------|------|---------|
| 62    | 2     | LP05 | 3.7    | 0.1     | 3.7   | 0.4  | 7.9  | 8    | 110     |
| 62    | 4     | LP05 | 4.3    | 0.4     | 6.1   | 0.1  | 10.9 | 8    | 220     |
| 63    | 1     | LP05 | 3.9    | 1.1     | 2.8   | 0.1  | 7.9  | 8    | 55      |
| 63    | 2     | LP05 | 7.1    | 0.2     | 3     | 0.2  | 10.5 | 8    | 110     |
| 63    | 1     | LP05 | 5.2    | 0       | 1.2   | 0    | 6.4  | 8    | 55      |
| 66    | 1     | LP05 | 8.1    | 0       | 0.2   | 0.1  | 8.4  | 8    | 55      |
| 66    | 5     | LP05 | 9      | 0.4     | 7.6   | 0.7  | 17.7 | 8    | 275     |
| 66    | 1     | LP05 | 2.8    | 0.3     | 3.3   | 0.1  | 6.5  | 8    | 55      |
| 67    | 4     | LP05 | 3.2    | 0.1     | 2.7   | 0.1  | 6.1  | 8    | 220     |
| 68    | 5     | LP05 | 4.5    | 0.2     | 6     | 0.6  | 11.3 | 8    | 275     |
| 68    | 2     | LP05 | 2.4    | 0.3     | 5.4   | 1    | 9.1  | 8    | 110     |
| 68    | 2     | LP05 | 4.3    | 0.5     | 1.8   | 0.2  | 6.8  | 8    | 110     |
| 69    | 2     | LP05 | 2.6    | 0.2     | 5.8   | 0.1  | 8.7  | 8    | 110     |
| 69    | 3     | LP05 | 4.7    | 0.5     | 2.8   | 0.6  | 8.6  | 8    | 165     |
| 69    | 17    | LP05 | 4.2    | 0.8     | 3.6   | 0.4  | 9    | 8    | 935     |
| 69    | 1     | LP05 | 2.3    | 0.1     | 6.5   | 0.1  | 9    | 8    | 55      |

**Figura 41. Diagrama conceptual de la obtención de tonelaje y eventos**



### 3.3.1. Análisis información. Piques de traspaso año 2016

Realizada la descripción y análisis detallado de las bases de datos disponibles para este estudio, la información contenida en estas se presenta a continuación:

#### Mina análisis productividad

Para un primer análisis de los datos contenidos en la planilla “*Historical truck by LP 2006.xls*”, la cual entrega los tonelajes extraídos de cada pique, se presenta el siguiente gráfico:

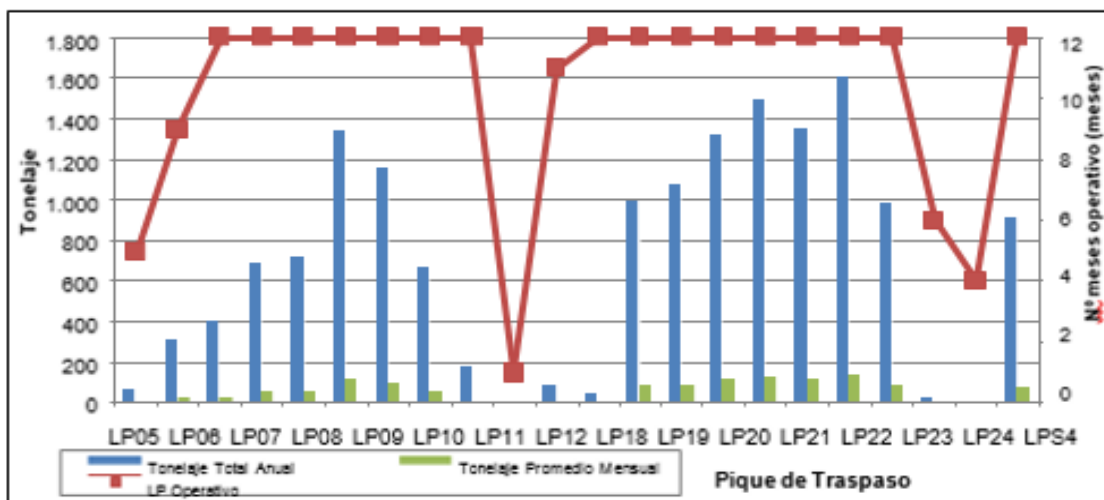


Figura 42. Producción piques de traspaso año 2006

Se aprecia en el gráfico:

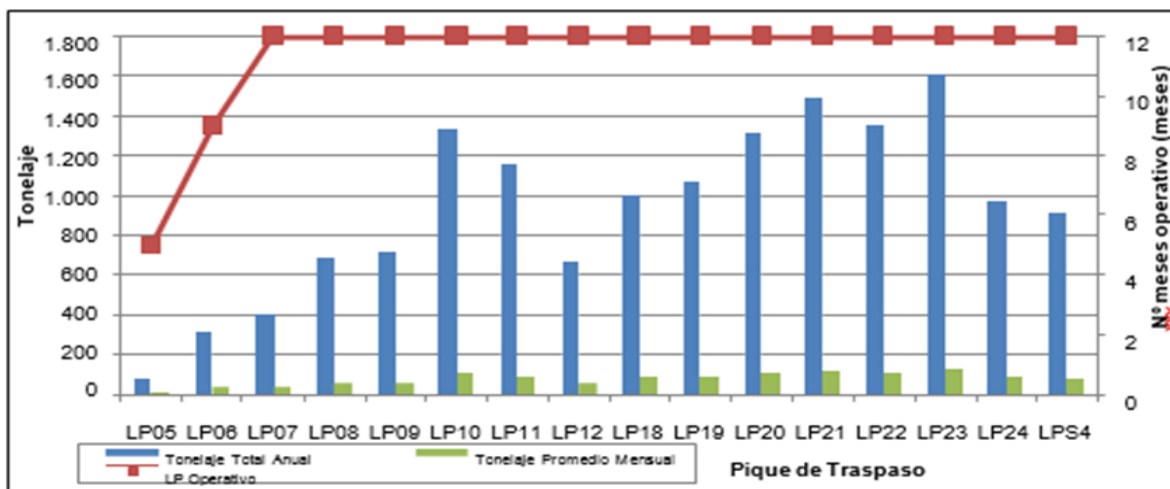
- Número de meses en que estuvo operativo el pique de traspaso: se aprecia que para los LP05 – LP06 – LP15 – LP16 – LPN1 – LPS3, no están activos durante todos los meses del año 2006.
- Tonelaje anual y promedio mensual extraído para cada pique: se aprecian productividades mayores a 600 Kt/año, salvo en los LP05 – LP06 – LP13 – LP15 – LP16 – LP17 – LPN1 – LPS3, y promedios mensuales muy bajos (menores a 7 Kt) para LP15 – LP16 – LP17 – LPN1 – LPS3.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, se determina lo siguiente para el posterior análisis:

- Los piques LP05 – LP06 comienzan a producir durante el año 2006. Por lo que el comportamiento presentado en el Gráfico 7, es normal para un pique nuevo.
- Los piques LP 13 – LP 15 – LP 16 – LP 17 – LP N 1 – LP S 3, presentan un comportamiento productivo durante el año y el mes que no permite análisis, además dista de lo observado en el resto de los piques en cuanto a la variabilidad que presentan en el tiempo (no operan todos los meses, ni meses seguidos).

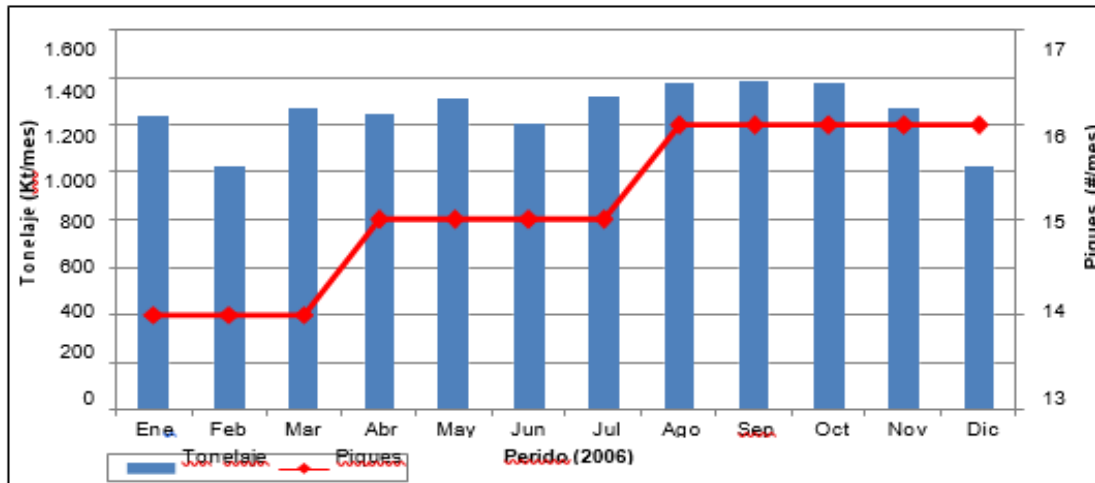
Debido a lo anteriormente mencionado, se opta por dejar fuera del posterior análisis en que está enmarcado este trabajo a los piques de traspaso LP13 – LP15 – LP16 – LP17 – LPN1 – LPS3, puesto que no son piques que comenzaron su producción en el año 2006, como es el caso de LP05 – LP06.

Por lo tanto, el Gráfico de la figura 43 queda representado de la siguiente manera:



**Figura 43. Producción (total y promedio) piques de traspaso (sin datos insual)**

Este gráfico presenta piques de traspaso en régimen y piques que recién están produciendo. Otro resultado que entregan los datos es la productividad mensual de la mina DOZ y el número de piques de activos que hay durante cada período (mes). Lo anteriormente mencionado, se presenta en el siguiente gráfico:



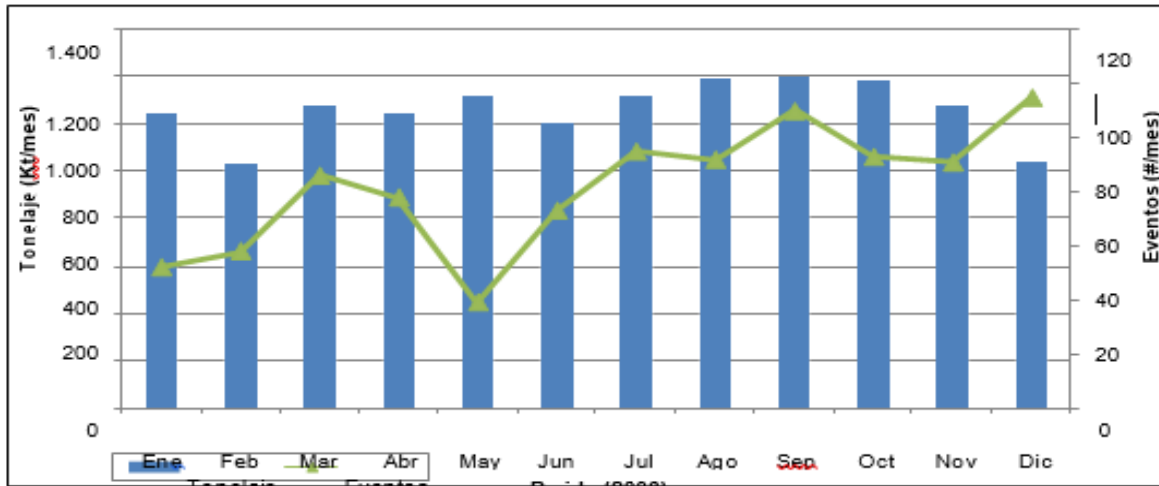
**Figura 44. Productividad mensual y número de piques activos por periodo**

Se aprecia en el gráfico anterior, que a medida que el número de piques de traspaso aumenta la producción aumenta. Sin embargo, cuando el número de piques se mantiene estable, la productividad tiende a mantenerse o a disminuir, tal como se aprecia desde los meses de agosto a diciembre

### Análisis eventos

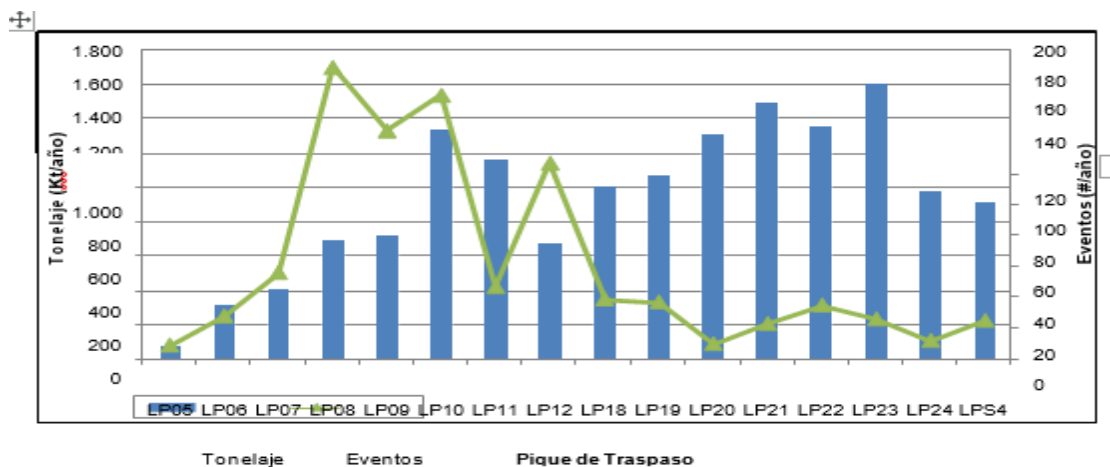
De acuerdo a lo presentado en el capítulo referente a la descripción de las bases de datos, las interferencias operacionales (evento) sucedidas en la mina se obtienen de la hoja de trabajo *Producción*. (tabla 4)

Se entenderá como evento en los piques de traspaso, toda interferencia en el flujo de mineral, sin importar la duración que este tenga. Con lo anterior se obtienen los siguientes gráficos:



**Figura 45. Número de eventos por mes y tonelaje extraído por mes año 2006**

En la figura 45 se puede apreciar, que el número de eventos ocurridos en todos los piques de traspaso es relativamente variable, teniendo mínimos del orden de los 40 eventos (mayo) y máximos del orden de los 120 eventos (diciembre). Además, no se aprecia claramente alguna relación entre el número de eventos y la productividad de la mina, este requiere un mayor análisis a nivel de pique. En el siguiente gráfico que está alimentado por se aprecia de manera más clara la influencia del número de eventos en la productividad del pique de traspaso.



**Figura 46. Número de eventos por mes y tonelaje anuales por pique**

Claramente existe una relación entre los eventos ocurridos durante el año y la producción que el pique de traspaso tiene, siendo los piques que presentan una mayor

madurez los que menos falla, al contrario de piques más jóvenes que presentan un número de fallas mucho mayor y mucho más variable. Como resumen de la producción y de los eventos ocurridos durante el año 2006, se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 5. Tabla resumen: piques de traspaso año 2006**

| LP   | Tonelaje Promedio [t/mes] | Tonelaje Total [t/año] | Tonelaje Acumulado [t] | Eventos Prom. [#mes] | Eventos Total [#año] |
|------|---------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| LP05 | 14,076                    | 70,380                 | 70,380                 | 2                    | 9                    |
| LP06 | 34,541                    | 310,868                | 310,868                | 3                    | 28                   |
| LP07 | 33,473                    | 401,672                | 421,301                | 5                    | 56                   |
| LP08 | 57,542                    | 690,506                | 801,330                | 16                   | 189                  |
| LP09 | 59,769                    | 717,232                | 1,051,180              | 12                   | 148                  |
| LP10 | 111,136                   | 1,333,632              | 1,834,027              | 14                   | 171                  |
| LP11 | 96,477                    | 1,157,728              | 1,783,104              | 4                    | 47                   |
| LP12 | 55,813                    | 669,760                | 1,451,779              | 11                   | 127                  |
| LP18 | 83,375                    | 1,000,500              | 5,918,245              | 3                    | 39                   |
| LP19 | 88,930                    | 1,067,154              | 6,414,494              | 3                    | 37                   |
| LP20 | 109,196                   | 1,310,356              | 6,598,531              | 1                    | 10                   |
| LP21 | 124,204                   | 1,490,446              | 6,213,098              | 2                    | 23                   |
| LP22 | 112,919                   | 1,355,022              | 5,573,125              | 3                    | 35                   |
| LP23 | 133,603                   | 1,603,238              | 5,226,024              | 2                    | 26                   |
| LP24 | 81,328                    | 975,936                | 3,703,158              | 1                    | 12                   |
| LPS4 | 76,030                    | 912,364                | 4,394,165              | 2                    | 25                   |

### 3.4. Sectorización piques de traspasos

Una mina de panel *caving* y *sub level caving* puede entenderse como un sistema compuesto de “n” componentes (puntos de extracción, piques de traspaso, buzones, etc.), sujeto a la eventual ocurrencia de eventos de interferencia debido al desgaste por el funcionamiento del mismo y al tipo de material que se moviliza dentro de él, que se traducen en la detención de ciertos sectores que agrupan una o varias componentes del sistema, por sus relaciones de conectividad.

Sin embargo, una característica fundamental de este sistema es que sus componentes son reparables y que la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos de interrupción, depende de la utilización de sus componentes y su grado de madurez, tanto como de sus características propias (por ejemplo: calidad de la roca donde están emplazadas las excavaciones, calidad de la fortificación utilizada, etc.).

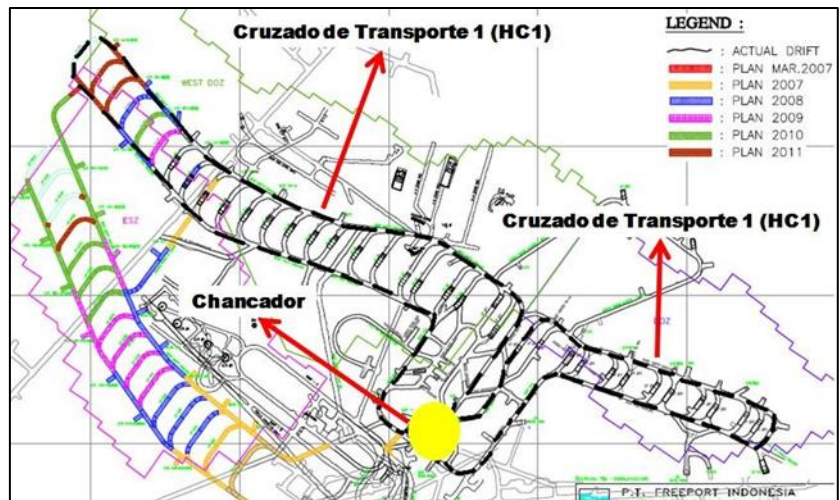
La idea de sectorizar el nivel de transporte nace al comprender que, si bien su funcionalidad global es única, su extensión en planta es importante. Sumado al hecho que el macizo rocoso es de naturaleza variable, y que las operaciones mineras influyen en su estabilidad, resulta natural pensar que cada componente del nivel de transporte, tiene una probabilidad de ocurrencia de eventos de interferencia puntual y distinta de sus pares, sin embargo, presumiblemente pueden encontrarse sectores con un comportamiento similar, cuyo funcionamiento en conjunto a otras componentes del sistema minero tienen una productividad intrínseca asociada, que dependerá, entre otros factores, de la frecuencia de ocurrencia de interferencias.

### 3.4.1. Sectorización por cruzada de transporte

Cada pique de traspaso está relacionado con un cruzado de transporte (HC) específico. Para el año 2006, se encuentran 2 cruzados en operación, los cuales tienen relacionados cierto número de piques de traspaso. En la siguiente tabla se muestra esta relación:

**Tabla 6. Relación pique de traspaso – cruzada de transporte**

| Nivel de Transporte |      |
|---------------------|------|
| HC1                 | HC2  |
| LP18                | LP05 |
| LP19                | LP06 |
| LP20                | LP07 |
| LP21                | LP08 |
| LP22                | LP09 |
| LP23                | LP10 |
| LP24                | LP11 |
| LPS4                | LP12 |

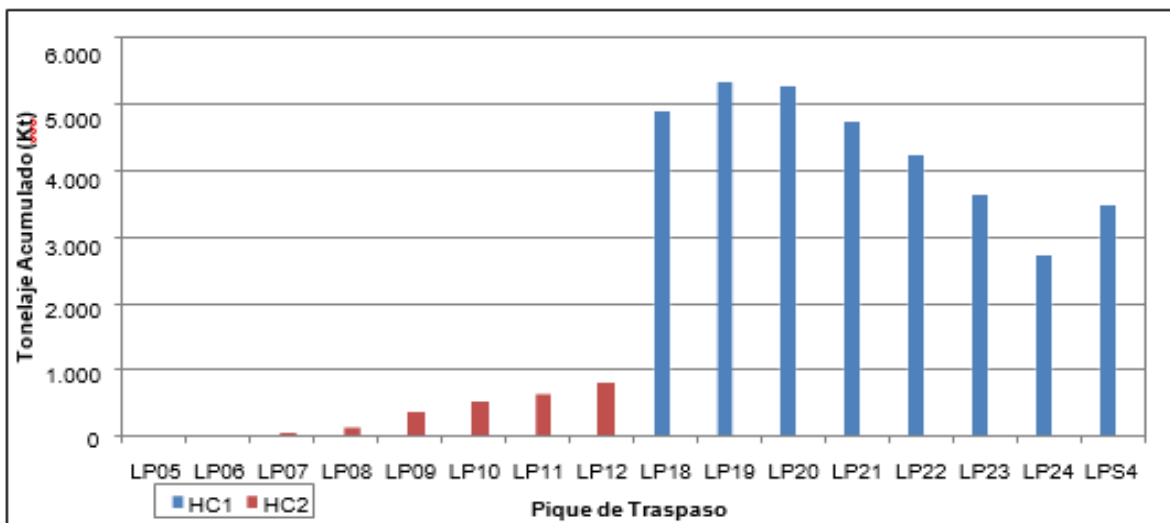


**Figura 47. Cruzados de transporte**

Según lo definido en la tabla 6 se realizan los siguientes análisis:

### Producción

El primer análisis es identificar los tonelajes acumulados para cada pique, pero relacionados con su respectivo HC.



**Figura 48. Tonelaje acumulado por pique y según relación HC**

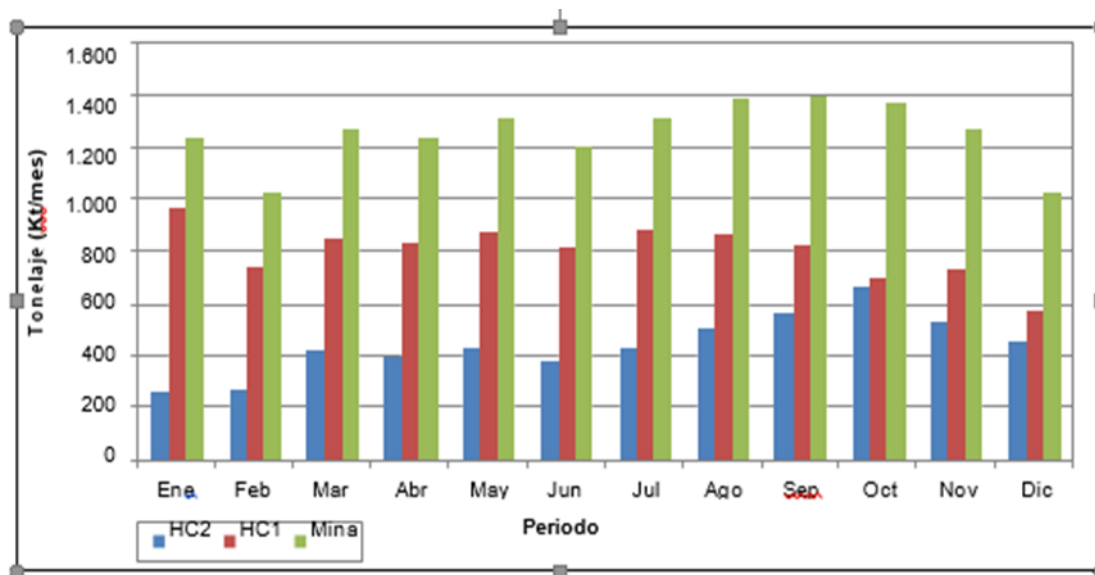
Lo observado en el gráfico anterior, evidencia que los piques que se encuentran conectados por el HC2, presentan una madurez mucho mayor que los del HC1. Siendo éstos, los que sustentan la producción de la mina.

Luego de conocer la madurez de cada pique, se presentan en el siguiente gráfico y tabla de estadísticas básicas la producción de cada cruzado de transporte y de la mina.

**Tabla 7. Estadísticas básicas de toneladas por piques de traspaso**

| Tonelaje Mina     |            | Tonelaje HC1      |           | Tonelaje HC2      |           |
|-------------------|------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Media (t/mes)     | 82,785     | Media (t/mes)     | 101,198   | Media (t/mes)     | 62,230    |
| Dev. Est. (t/mes) | 37,135     | Dev. Est. (t/mes) | 28,167    | Dev. Est. (t/mes) | 35,206    |
| Mínimo (t/mes)    | 2,852      | Mínimo (t/mes)    | 13,386    | Mínimo (t/mes)    | 2,852     |
| Máximo (t/mes)    | 172,500    | Máximo (t/mes)    | 172,500   | Máximo (t/mes)    | 151,248   |
| Suma (t/mes)      | 15,066,794 | Suma (t/año)      | 9,715,016 | Suma (t/año)      | 5,351,778 |
| Nº Registros      | 182        | Nº Registros      | 96        | Nº Registros      | 86        |

Las diferencias de toneladas promedios para cada cruzado de transporte se deben al número de piques activos durante el periodo y la madurez que estos presentan.



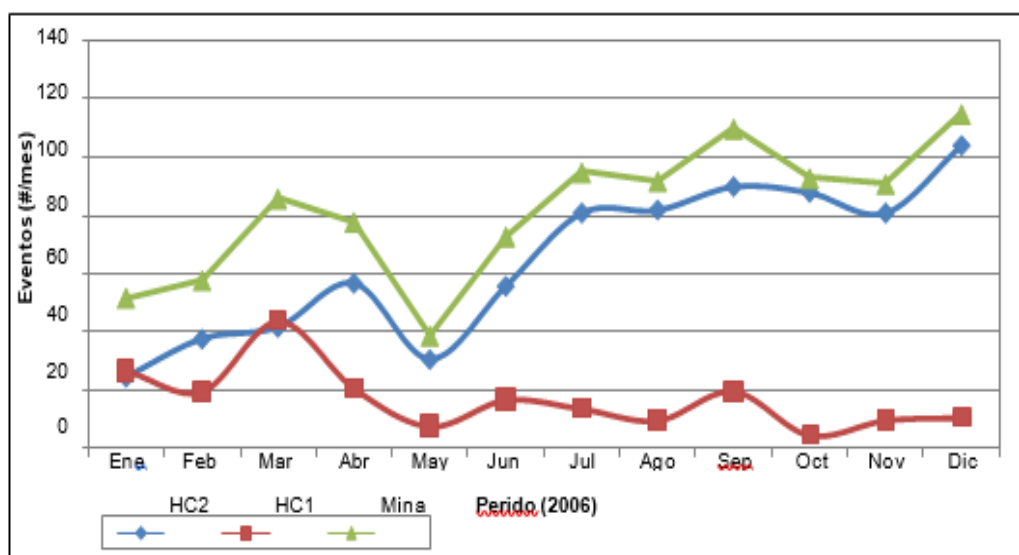
**Figura 49. Producción para cada HC y mina**



**Tabla 8. Estadísticas básicas de número de eventos por piques de traspaso**

| Eventos Mina      |     | Eventos HC1    |     | Eventos HC2       |     |
|-------------------|-----|----------------|-----|-------------------|-----|
| Media (#/mes)     | 5   | Media (#/mes)  | 2   | Media (#/mes)     | 9   |
| Dev. Est. (#/mes) | 7   | Dev. Est.      | 3   | Dev. Est. (#/mes) | 8   |
| Mínimo (#/mes)    | 0   | Mínimo (#/mes) | 0   | Mínimo (#/mes)    | 0   |
| Máximo (#/mes)    | 33  | Máximo (#/mes) | 19  | Máximo (#/mes)    | 33  |
| Suma (#/año)      | 982 | Suma (#/año)   | 207 | Suma (#/año)      | 775 |
| Nº Registros      | 182 | Nº Registros   | 96  | Nº Registros      | 86  |

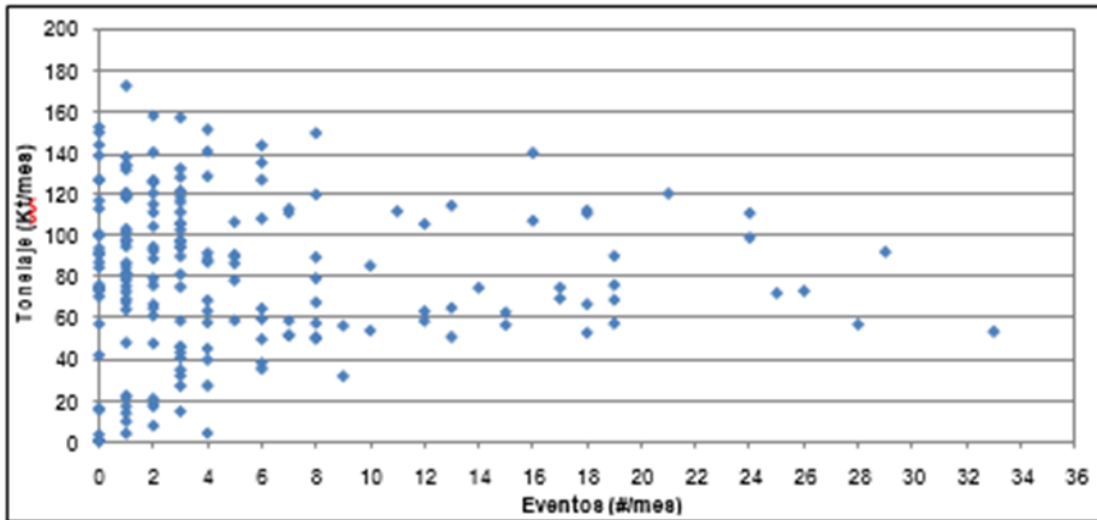
Igual que para los tonelajes las diferencias presentes en los promedios para cada cruzado de transporte se deben a la madurez que los piques presentan, ya que a piques más nuevos el número de interferencias operacionales es mayor.



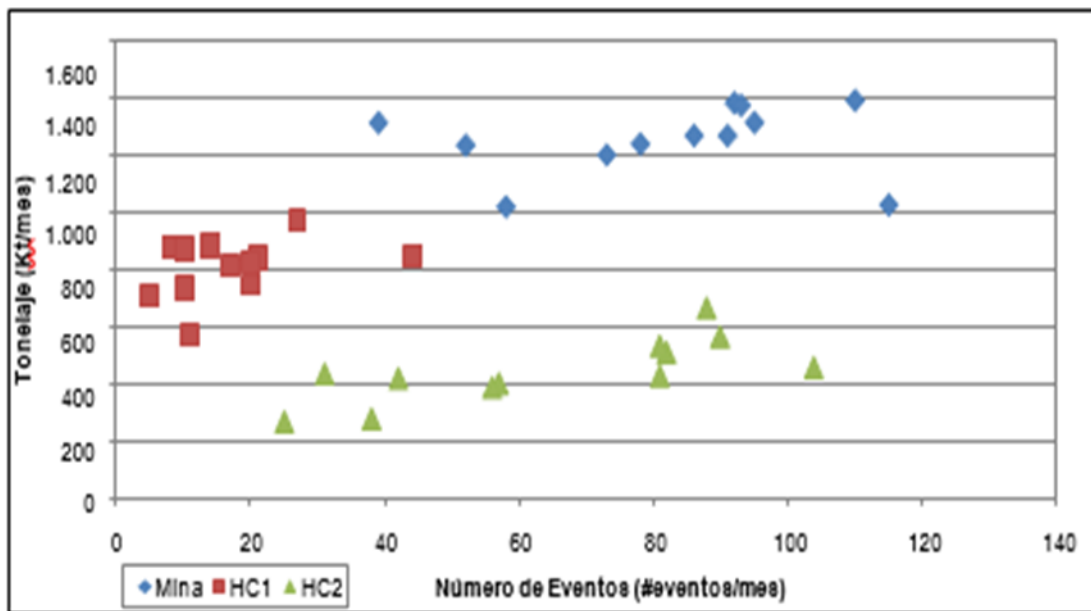
**Figura 50. Número de eventos por HC**

Se observa que la mayoría de los eventos sucede en los piques que presentan una menor madurez (HC2). En cambio, para los piques más antiguos (HC1), el número de eventos es estable durante casi todos los períodos (aproximadamente 20 por mes).

A continuación, se presenta el gráfico que muestra la relación número de eventos ocurridos en el mes y tonelaje extraído durante el mismo periodo.



**Figura 51. Producción mensual versus número de eventos mensuales por pique de traspaso**



**Figura 52. Producción mensual versus número de eventos según sectorización**

En resumen, se aprecia que la productividad de los piques no está condicionada al número de eventos.

### 3.4.2. Por tipo de eventos

Según se presenta en la tabla 41 (capítulo análisis bases de datos), los tipos de eventos que suceden en los piques de traspaso son:

- a) Colgadas: cuando se forman arcos de mineral que impiden el libre flujo de mineral por el pique de traspaso.
- b) Parrillas (BO): regulan el tamaño máximo del mineral que es vaciado al pique de traspaso; éstas al ser reparadas o cambiadas, el pique deja de producir.
- c) Reparación buzones (N/U): estructura que regula el flujo de mineral que es vaciado al camión; al ser una componente mecánica ésta presenta fallas, las que al ser reparadas afectan la producción del pique.
- d) Mantenimiento programada (PM): mantenciones que se realizan al pique.
- e) Cerrado (CLOSE): pique cerrado debido a diversos problemas que puedan suceder que están asociados a las componentes mecánicas del pique y que no están especificados en los anteriores tipos de fallas.

Las anteriores pueden considerarse, en su conjunto, como todas las interferencias operacionales que afectan el libre flujo de mineral por los piques de traspaso. Sin embargo, estos se asocian en dos grupos, los cuales son:

- Colgadas (1): todo tipo de interferencia operacional que tiene relación con el mineral que fluye por pique.
- Mecánicas (2 – 3 – 4 – 5): toda interferencia operacional que esté relacionada con una componente mecánica del sistema.

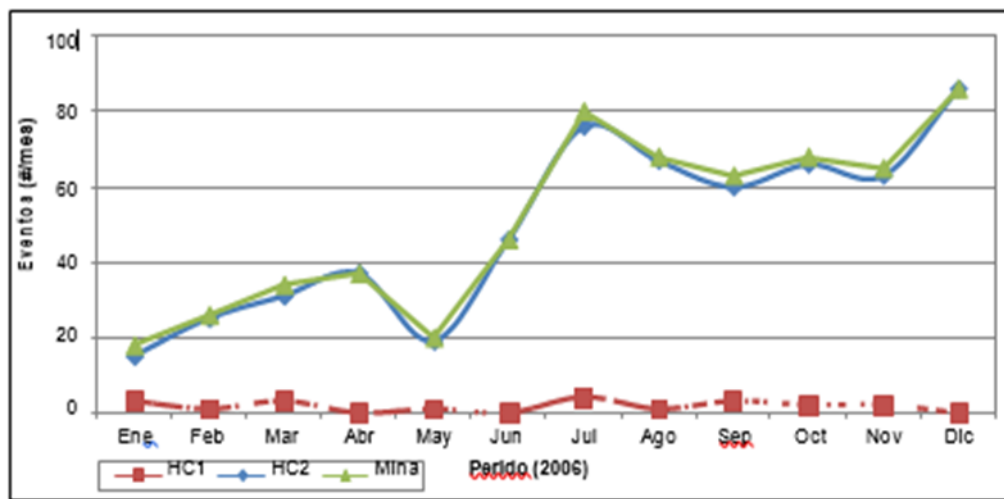
Entonces quedan definidos dos grupos fenomenológicos de eventos, los cuales serán analizados a continuación.

### **3.4.3. Colgadas**

De acuerdo a lo observado es el evento más común que sucede en los piques de traspaso, el comportamiento de estos se presenta en los siguientes gráficos y tablas:

**Tabla 9. Estadísticas básicas de colgaduras en piques de traspaso**

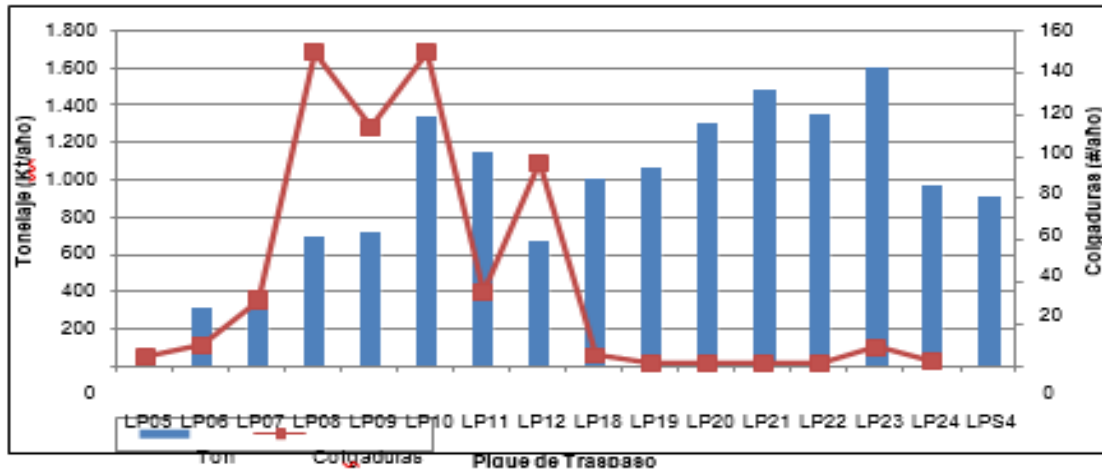
| Colgaduras Mina   |     | Colgaduras HC1    |     | Colgaduras HC2    |     |
|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
| Media (#/mes)     | 3   | Media (#/mes)     | 0.2 | Media (#/mes)     | 7   |
| Dev. Est. (#/mes) | 6   | Dev. Est. (#/mes) | 0.6 | Dev. Est. (#/mes) | 7   |
| Mínimo (#/mes)    | 0   | Mínimo (#/mes)    | 0   | Mínimo (#/mes)    | 0   |
| Máximo (#/mes)    | 28  | Máximo (#/mes)    | 4   | Máximo (#/mes)    | 28  |
| Suma (#/año)      | 611 | Suma (#/año)      | 20  | Suma (#/año)      | 591 |
| N° Registros      | 182 | N° Registros      | 96  | N° Registros      | 86  |



**Figura 53. Número de colgaduras por HC y mina**

Se observa una tendencia claramente marcada: que los eventos de colgaduras suceden en mayor cantidad, en los piques que presentan una madurez menor (HC2), casi no existiendo en piques asociados al HC1. Estos son el evento más frecuente en los piques de traspaso.

Además, se puede obtener el número de colgaduras por pique durante el año 2006.



**Figura 54. Número de colgaduras por pique**

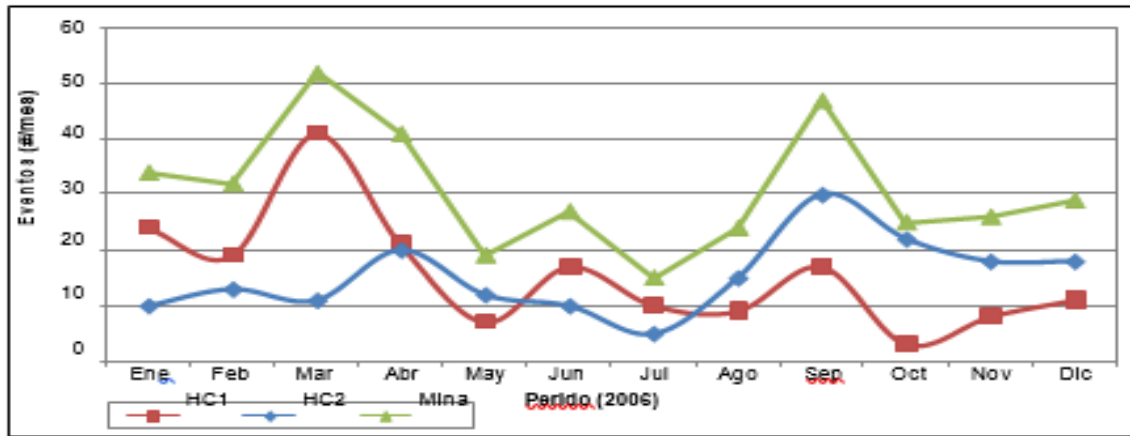
Es evidente que el mayor número de colgaduras suceden en piques por los cuales ha pasado una menor cantidad de mineral. Esto afecta de sobremanera la producción, ya que, en el inicio de la vida del pique, el tonelaje planificado a pasar por éste es menor que cuando se encuentra en régimen. Sumado al alto número de colgaduras que suceden en los piques nuevos, la producción se resiente creando una mayor incertidumbre en los planes de producción.

### Mecánicos

De acuerdo a lo observado en la Tabla se observa el siguiente comportamiento de los eventos mecánicos:

**Tabla 10. Estadísticas básicas de eventos mecánicos de piques de traspaso**

| Mecánicos mina    |     | Mecánicos HC1     |     | Mecánicos HC2     |     |
|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
| Media (#/mes)     | 2   | Media (#/mes)     | 2   | Media (#/mes)     | 2   |
| Dev. Est. (#/mes) | 2   | Dev. Est. (#/mes) | 3   | Dev. Est. (#/mes) | 2   |
| Mínimo (#/mes)    | 0   | Mínimo (#/mes)    | 0   | Mínimo (#/mes)    | 0   |
| Máximo (#/mes)    | 19  | Máximo (#/mes)    | 19  | Máximo (#/mes)    | 9   |
| Suma (#/año)      | 371 | Suma (#/año)      | 187 | Suma (#/año)      | 184 |
| Nº Registros      | 182 | Nº Registros      | 96  | Nº Registros      | 86  |



**Figura 55. Número de eventos mecánicos por HC y mina**

Existe una tendencia levemente marcada, en que el HC2 presenta un mayor número de interferencias operacionales del tipo mecánicas, sin embargo, estos se mantienen casi constantes en el tiempo, para ambos cruzados de transporte. Además, tiene el número de eventos mecánicos que suceden durante el año 2006, en cada pique de traspaso:

Se aprecia que no existe una tendencia clara en cuanto al número de eventos, pero se infiere desde el gráfico que para componentes mecánicas nuevas y viejas (LP05 – LP06 – LP07 – LP09 – LP18 – LP19 – LP22), el número de eventos es mayor que las que se encuentran en régimen (LP10 – LP11 – LP12 – LP20 – LP21), o sea su comportamiento se asemeja a la “curva tipo bañera” (Ilustración 3). Cabe destacar que esta categorización se hace considerando el número de toneladas que han pasado por estas componentes (parrillas, buzón).

En resumen, se puede obtener de la sectorización de los piques de traspaso, el siguiente gráfico y la siguiente tabla:

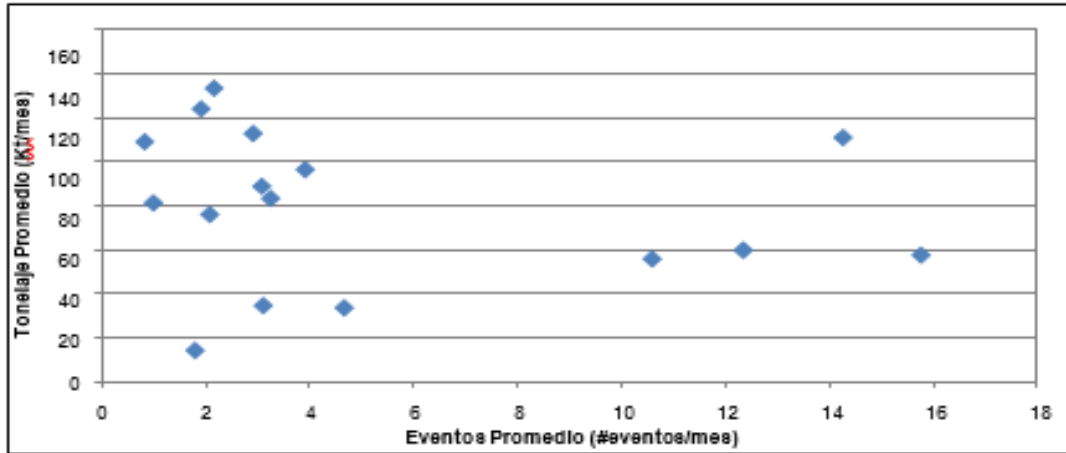


Figura 56. Tonelaje promedio mensual versus número de eventos para pique de traspaso

Tabla 11. Tabla resumen del análisis de piques de traspaso

| LP   | HC  | Tonelaje | Tonelaje  | Tonelaje  | Eventos | Eventos | Colgaduras | Colgaduras | Mecánicos | Mecánicos |
|------|-----|----------|-----------|-----------|---------|---------|------------|------------|-----------|-----------|
|      |     | Promedio | Total     | Acumulado | Prom.   | Total   | Prom.      | Total.     | Prom.     | Total.    |
|      |     | [t/mes]  | [t/año]   | [t]       | [#/mes] | [#/año] | [#/mes]    | [#/año]    | [#/mes]   | [#/año]   |
| LP05 | HC2 | 14,076   | 70,38     | 70,38     | 2       | 9       | 1          | 4          | 1         | 5         |
| LP06 | HC2 | 34,541   | 310,868   | 310,868   | 3       | 28      | 1          | 10         | 2         | 18        |
| LP07 | HC2 | 33,473   | 401,672   | 421,301   | 5       | 56      | 3          | 31         | 2         | 25        |
| LP08 | HC2 | 57,542   | 690,506   | 801,33    | 16      | 189     | 13         | 150        | 3         | 39        |
| LP09 | HC2 | 59,769   | 717,232   | 1,051,180 | 12      | 148     | 10         | 114        | 3         | 34        |
| LP10 | HC2 | 111,136  | 1,333,632 | 1,834,027 | 14      | 171     | 13         | 150        | 2         | 21        |
| LP11 | HC2 | 96,477   | 1,157,728 | 1,783,104 | 4       | 47      | 3          | 35         | 1         | 12        |
| LP12 | HC2 | 55,813   | 669,76    | 1,451,779 | 11      | 127     | 8          | 97         | 3         | 30        |
| LP18 | HC1 | 83,375   | 1,000,500 | 5,918,245 | 3       | 39      | 0          | 5          | 3         | 34        |
| LP19 | HC1 | 88,93    | 1,067,154 | 6,414,494 | 3       | 37      | 0          | 1          | 3         | 36        |
| LP20 | HC1 | 109,196  | 1,310,356 | 6,598,531 | 1       | 10      | 0          | 1          | 1         | 9         |
| LP21 | HC1 | 124,204  | 1,490,446 | 6,213,098 | 2       | 23      | 0          | 1          | 2         | 22        |
| LP22 | HC1 | 112,919  | 1,355,022 | 5,573,125 | 3       | 35      | 0          | 1          | 3         | 34        |
| LP23 | HC1 | 133,603  | 1,603,238 | 5,226,024 | 2       | 26      | 1          | 9          | 1         | 17        |
| LP24 | HC1 | 81,328   | 975,936   | 3,703,158 | 1       | 12      | 0          | 2          | 1         | 10        |
| LPS4 | HC1 | 76,03    | 912,364   | 4,394,165 | 2       | 25      | 0          | 0          | 2         | 25        |

### 3.5. Curvas U y curvas de producción característica

#### 3.5.1. Piques de traspaso

A continuación, se describe detalladamente la construcción y análisis de las curvas U y curvas de producción características (PCC) para los piques de traspaso presentes en la mina DOZ PT Freeport.

### 3.5.2. Metodología de las curvas de producción

#### Eventos

Como se mencionó en el capítulo referente a las bases de datos del año 2006, es posible extraer los eventos que suceden en cada pique por mes, día, turno y hora. Con esto es posible ordenar y filtrar las interferencias operacionales, con el objetivo de obtener el número y tipo de evento que se produce en cada periodo (mes). Es importante señalar que se considera evento, a cualquier interferencia operacional que dure más de una hora, sin importar la duración final de éste. Por ejemplo:

| LP#06 | LP#07 | LP#8 |
|-------|-------|------|
| OK    | OK    | BO   |
| OK    | OK    | BO   |
| OK    | OK    | BO   |
| H/Up  | OK    | BO   |
| H/Up  | OK    | BO   |
| OK    | OK    | BO   |

Ambos casos son considerados como un evento

Figura 57. Ejemplo de duración de eventos

La información de los eventos de cada pique se tiene agrupada de manera mensual y por pique.

#### Tonelaje

Con respecto a los tonelajes asociados a cada pique, en su respectivo período, se obtuvieron de los ciclos realizados por los camiones en el cruzado de transporte, los cuales se presentan en las planillas “*historical truck by LP 2006*”. Cabe destacar que, a cada ciclo, se le asignó un tonelaje fijo, el que es de 46 toneladas. Con esta información se puede obtener el tonelaje mensual extraído de cada pique.

Luego con la información de los tonelajes mensuales y con los tonelajes acumulados de cada pique hasta el año 2005 se obtiene la tabla de tonelajes acumulados para el año 2006 la cual nos dará la madurez del pique en estudio.

En resumen; las tablas, número de eventos por mes, tonelaje extraído por mes y tonelaje acumulado por mes para cada pique, son las entradas para la construcción de las curvas U y PCC.



### 3.5.3. Curvas U

Previo a la construcción de la curva U, los datos de los puntos de extracción se agrupan de la siguiente manera:

**Tabla 12. Ejemplo de agrupación de datos previo a la construcción de Curvas U**

| Mes | LP   | Número de          |                       | Productividad  |
|-----|------|--------------------|-----------------------|----------------|
|     |      | Madurez Actual (t) | Eventos (eventos/mes) | Actual (t/mes) |
| 12  | LP20 | 6,598,531          | 0                     | 56,856         |
| 11  | LP20 | 6,541,675          | 0                     | 74,428         |
| 10  | LP20 | 6,467,247          | 0                     | 90,62          |
| 12  | LP19 | 6,414,494          | 2                     | 66,286         |
| 9   | LP20 | 6,376,627          | 0                     | 100,51         |
| 11  | LP19 | 6,348,208          | 2                     | 88,55          |
| 8   | LP20 | 6,276,117          | 1                     | 102,81         |
| 10  | LP19 | 6,259,658          | 1                     | 81,696         |
| 12  | LP21 | 6,213,098          | 0                     | 86,848         |
| 9   | LP19 | 6,177,962          | 0                     | 73,784         |
| 7   | LP20 | 6,173,307          | 1                     | 118,634        |

Luego la curva U se obtiene:

- a. Definir en una columna cotas máximas de madurez, las que no necesariamente presentan un intervalo de madurez constante.

Un ejemplo se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 13. Ejemplo de columna de madurez**

| Intervalos Madurez (t) |
|------------------------|
| <200000                |
| <600000                |
| <700000                |
| <1200000               |
| <1500000               |
| <1800000               |
| <2100000               |

b. Luego, se agrupan todas las filas que presenten tonelajes acumulados menores a la cota definida en el punto a, para posteriormente sumar los tonelajes contenidos en la columna productividad actual, que estén relacionados con un determinado tonelaje acumulado. A continuación, se define una nueva columna, que presenta el diferencial de producción entre los intervalos de madurez. El resultado de esta operación nos entrega lo siguiente:

**Tabla 14. Ejemplo de producción total y diferencial intervalo de madurez**

| Intervalos de Madurez (t) | Producción Total Intervalo de Madurez (t) | Producción Diferencial Intervalo de Madurez (t) |
|---------------------------|---|---|
| <200000                   | 1,233,398                                 | 1,233,398                                       |
| <600000                   | 1,563,494                                 | 330,096   |
| <700000                   | 1,860,884                                 | 297,390   |
| <800000                   | 2,202,112                                 | 341,228   |
| <1200000                  | 2,628,854                                 | 426,742   |
| <1500000                  | 3,123,124                                 | 494,270   |
| <2000000                  | 3,467,388                                 | 344,264   |
| <2100000                  | 3,683,450                                 | 216,062   |
| <2200000                  | 4,007,198                                 | 323,748   |
| <2400000                  | 4,276,528                                 | 269,330   |

c. Al igual que en el punto b, se agrupan todas las filas que presenten tonelajes acumulados menores a la cota definida en el punto 1, para posteriormente sumar los eventos contenidos en la columna número de eventos que estén relacionados con un determinado tonelaje acumulado.

A continuación, se define una nueva columna, que presenta el diferencial del número de eventos entre los intervalos de madurez. El resultado de esta operación nos entrega lo siguiente:

**Tabla 15. Ejemplo de número de eventos totales y diferencial de intervalo de madurez**

| Intervalos de Madurez (t) | Eventos Total Intervalo de Madurez | Eventos Diferencial Intervalo de Madurez |
|---------------------------|------------------------------------|--|
| <200000                   | 177                                | 177                                      |
| <600000                   | 238                                | 61                                       |
| <700000                   | 286                                | 48                                       |
| <800000                   | 346                                | 60                                       |
| <1200000                  | 418                                | 72                                       |
| <1500000                  | 514                                | 96                                       |
| <2000000                  | 560                                | 46                                       |
| <2100000                  | 600                                | 40                                       |
| <2200000                  | 647                                | 47                                       |
| <2400000                  | 679                                | 32                                       |

d. Por último, para cada intervalo, se calcula la frecuencia de ocurrencia de eventos como la división entre el diferencial de eventos y el diferencial de producción.

A continuación, se presenta un ejemplo de la tabla completa para obtener la Curva U:

**Tabla 16. Ejemplo de tabla fina para construcción de la curva U**

| Intervalos de Madurez (t) | Producción Total Por Intervalo de Madurez (t) | Producción Diferencial Intervalo de Madurez (t) | Eventos Total Intervalo de Madurez (#) | Eventos Diferencial Intervalo de Madurez (#) | Frecuencia Ocurrencia Eventos (# Eventos/t) |
|---------------------------|---|---|--|--|---|
| <200000                   | 1,233,398                                     | 1,233,398                                       | 177                                    | 177  | 1.44E-04                                    |
| <600000                   | 1,563,494                                     | 330,096   | 238                                    | 61   | 1.85E-04                                    |
| <700000                   | 1,860,884                                     | 297,39  | 286                                    | 48   | 1.61E-04                                    |
| <800000                   | 2,202,112                                     | 341,228   | 346                                    | 60   | 1.76E-04                                    |
| <120000                   | 2,628,854                                     | 426,742   | 418                                    | 72   | 1.69E-04                                    |
| <150000                   | 3,123,124                                     | 494,27  | 514                                    | 96   | 1.94E-04                                    |
| <200000                   | 3,467,388                                     | 344,264   | 560                                    | 46   | 1.34E-04                                    |
| <210000                   | 3,683,450                                     | 216,062   | 600                                    | 40   | 1.85E-04                                    |
| <220000                   | 4,007,198                                     | 323,748   | 647                                    | 47   | 1.45E-04                                    |
| <240000                   | 4,276,528                                     | 269,33  | 679                                    | 32   | 1.19E-04                                    |

Para graficar la Curva U, se debe plotear en el eje X los intervalos de madurez, y en el eje Y la frecuencia de ocurrencia de eventos. El resultado de la metodología anterior se observa en el siguiente gráfico:

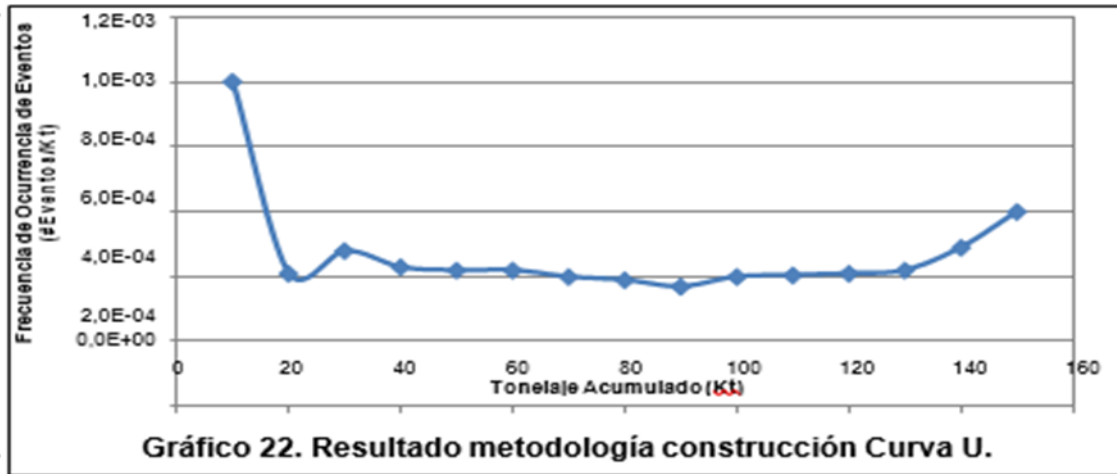


Figura 58. Resultado metodológico de la construcción de la curva U

### 3.5.4. Curvas PCC

Se construye a partir de la tabla 12, plotear en el eje x la columna correspondiente al número de eventos y en el eje Y la columna de productividad actual. Se presenta a continuación, la tabla necesaria para obtener la curva de producción característica (PCC).

Tabla 17. Ejemplo para la construcción de la curva PCC

| Mes | LP   | Número de Eventos (eventos/mes) | Productividad Actual (t/mes) |
|-----|------|---------------------------------|------------------------------|
| 12  | LP20 | 0                               | 56,856                       |
| 11  | LP20 | 0                               | 74,428                       |
| 12  | LP19 | 2                               | 66,286                       |
| 9   | LP20 | 0                               | 100,51                       |
| 11  | LP19 | 2                               | 88,55                        |
| 8   | LP20 | 1                               | 102,81                       |
| 10  | LP19 | 1                               | 81,696                       |
| 12  | LP21 | 0                               | 86,848                       |
| 9   | LP19 | 0                               | 73,784                       |
| 7   | LP20 | 1                               | 118,634                      |

El resultado de la anterior metodología de traduce en el siguiente gráfico:

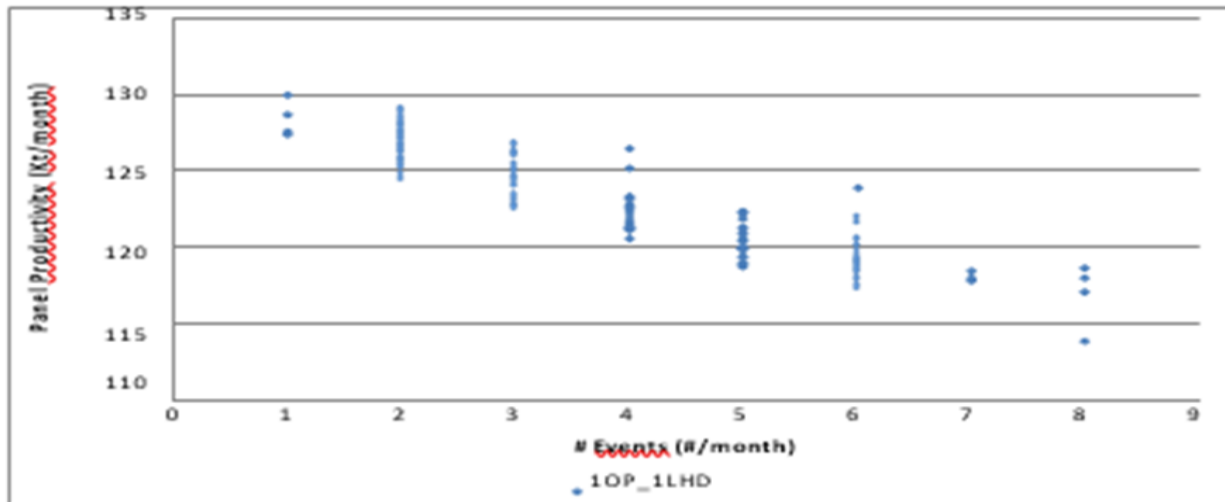


Figura 59. Resultado construcción de curva PCC

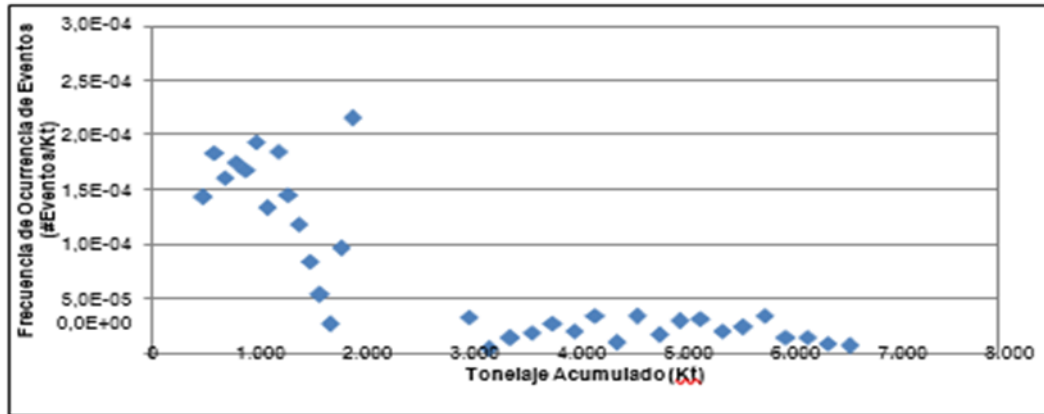
### 3.6. Resultados y análisis

Según lo mencionado en el capítulo de antecedentes, una óptima construcción de la curva U y PCC es fundamental para el cálculo de la confiabilidad de una componente minera.

A continuación, se presentan las curvas U y PCC de la mina, de los cruzados de transporte y según sea el tipo de evento, además de un análisis del comportamiento de estas.

#### 3.6.1. Curvas U

A continuación, se presentan las curvas U de los piques de traspaso, obtenidas de las bases de datos del año 2006

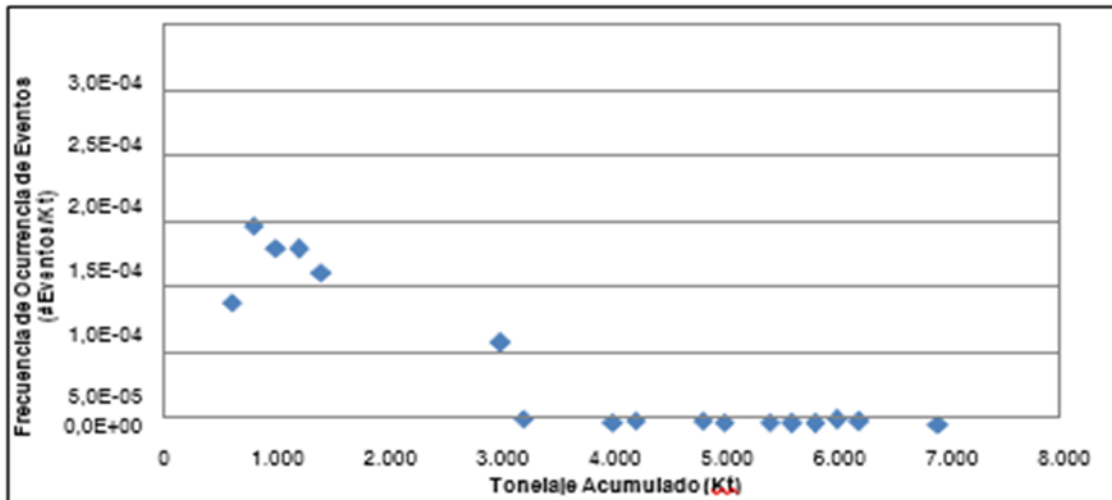


**Figura 60. Curva U piques de traspaso DOZ**

Se presenta en el gráfico anterior la forma de la curva U de los piques de traspaso de la mina PT Freeport DOZ, la cual representa la tendencia de una componente de infraestructura minera a ser interrumpida. Del gráfico anterior se desprende lo siguiente:

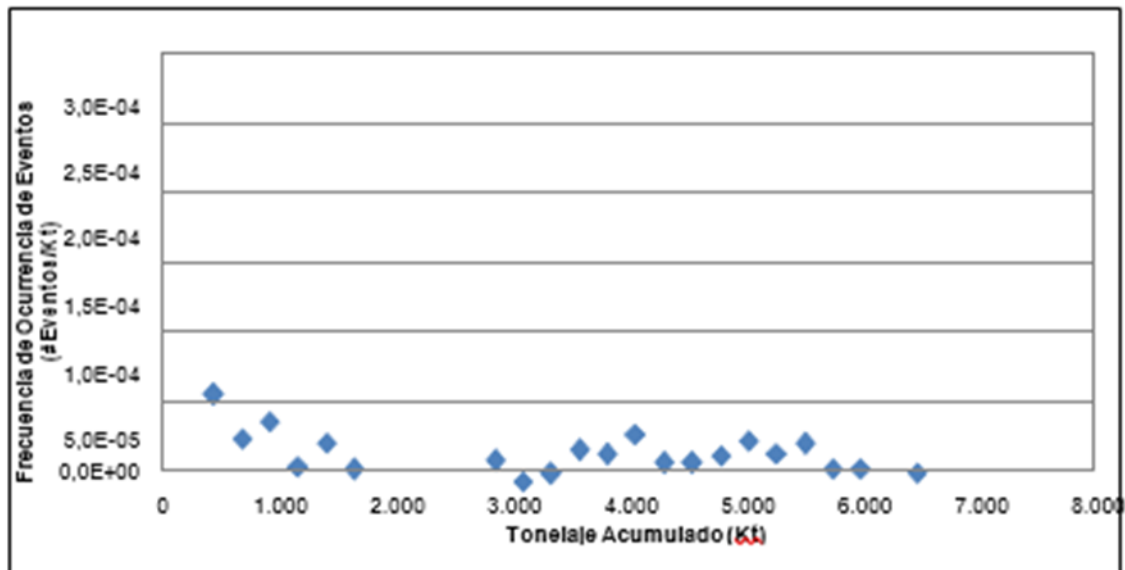
- a)** La forma obtenida, dista de la “curva de la bañera” asociada a los equipos de confiabilidad mecánicos. Sin embargo, el gráfico nos muestra dos tendencias claramente marcadas: la primera se puede asociar a fallas tempranas, cuando el pique recién ha comenzado a ser utilizado y el número de fallas es mayor y la segunda un período de régimen en que las interferencias operacionales son mínimas (aproximadamente cada 50 Kt).
- b)** Existe un vacío de información alrededor de las 2.000 Kt y las 3.000 Kt. esto ocurre debido a que la ventana de datos, con la que se cuenta para este análisis es de 1 año (2006), existiendo así vacíos de información, para los piques más viejos (comportamiento pasado de estos).

Por otra parte, se tiene la curva U, según el tipo de evento que ocurre en los piques. Éstas se presentan a continuación:



**Figura 61. Curva U colgaduras mina DOZ**

Para finalizar se obtiene la curva U para eventos mecánicos, la que se presenta a continuación:



**Figura 62. Curva U eventos mecánicos mina DOZ**

Al igual que en los casos anteriores, los piques asociados con el HC2 presentan una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos, sin embargo, ésta no es tan mayor como en los casos anteriores.

Se infiere de esto, que esta variable se puede controlar y conocer de una mejor manera que las colgaduras, con el objetivo de incorporarla como un parámetro conocido y que se puede predecir en la planificación minera.

En resumen, se tienen tres curvas de frecuencia de ocurrencia de eventos versus el tonelaje acumulado de cada pique; éstas se presentan a continuación:

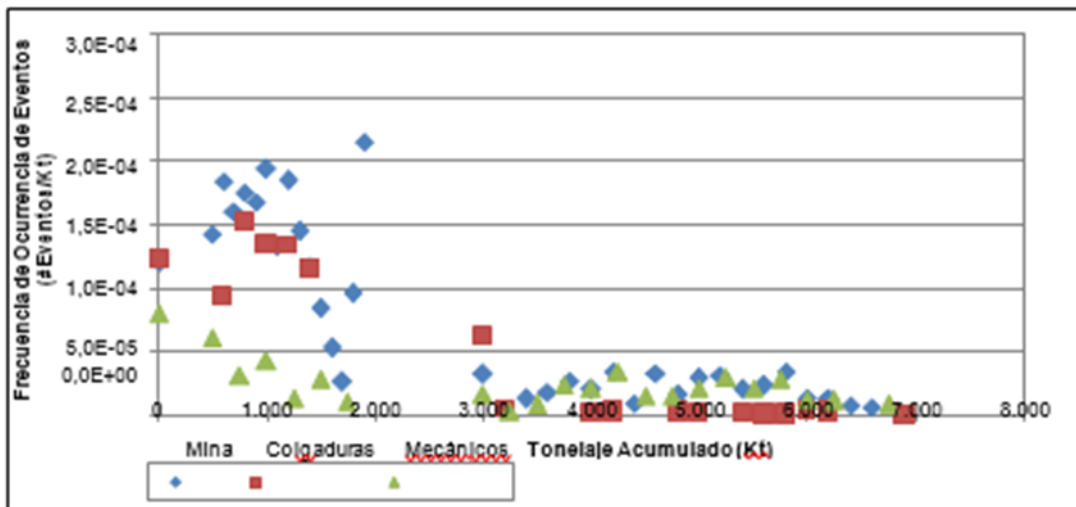


Figura 63. Resumen curvas U

### 3.4.1. Curva de producción característica (PCC)

A continuación, se presentan las PCC de los piques de traspaso, obtenidas de las bases de datos del año 2006

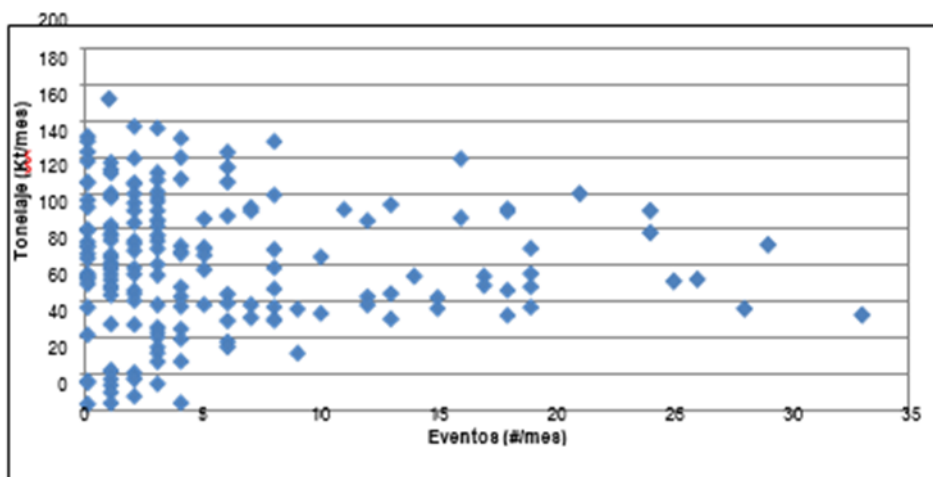


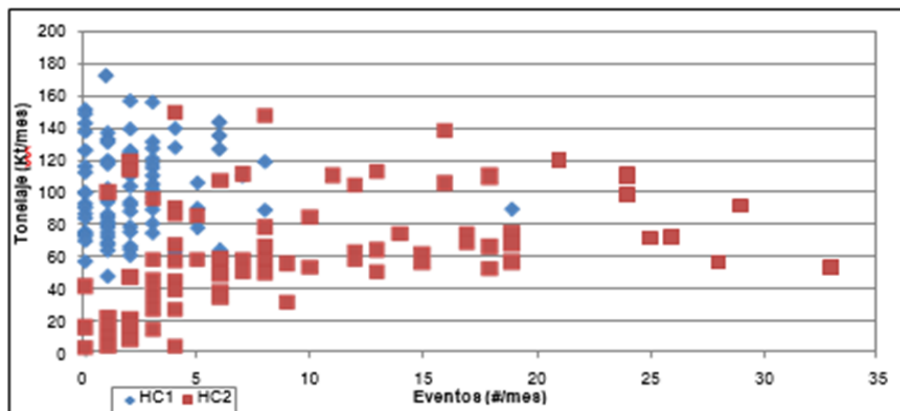
Figura 64. PCC versión preliminar mina DOZ



Basándose en los resultados obtenidos en la figura 64 es posible mencionar lo siguiente:

- La máxima productividad del pique de traspaso, está condicionada por el número de eventos que ocurrieron en este.
- Se aprecia una clara tendencia decreciente en los máximos relacionados a cada evento.
- A medida que aumentan los eventos, la producción tiende a estabilizarse en torno a las 40 Kt/mes – 70 Kt/mes.
- Se puede observar una alta variabilidad en los tonelajes, relacionados con un menor número de eventos; ésta se explica no solamente por el número de interferencias operacionales, sino también porque la extracción se planificó de esa manera.

Se presenta la PCC para los piques que están relacionados con el cruzado de transporte 1 (HC1), y para los piques que están relacionados con el cruzado de transporte 2 (HC2).



**Figura 65. PCC versión preliminar mina DOZ**

Se aprecia en los gráficos anteriores lo siguiente:

- Los piques relacionados con el HC1 presentan un menor número de eventos, comparados con los relacionados con el HC2.

- Los piques relacionados con el HC1 presentan mayores tonelajes que los relacionados con el HC2.
- Se observa que a medida que aumenta el tonelaje en el HC2 el número de eventos también aumenta, con esto se reafirma lo planteado anteriormente, en que la variabilidad de tonelajes no sólo depende del número de interferencias operacionales, sino que también con la planificación de la producción.
- Se aprecia en la figura 66 una tendencia a la disminución de los tonelajes, a medida que el número de eventos aumenta. Se evidencia que para los piques que están en régimen, y que presentan una mayor madurez, si afecta el número de eventos que suceden.

### **3.7. Incorporaciones curvas U y PCC en modelo de confiabilidad**

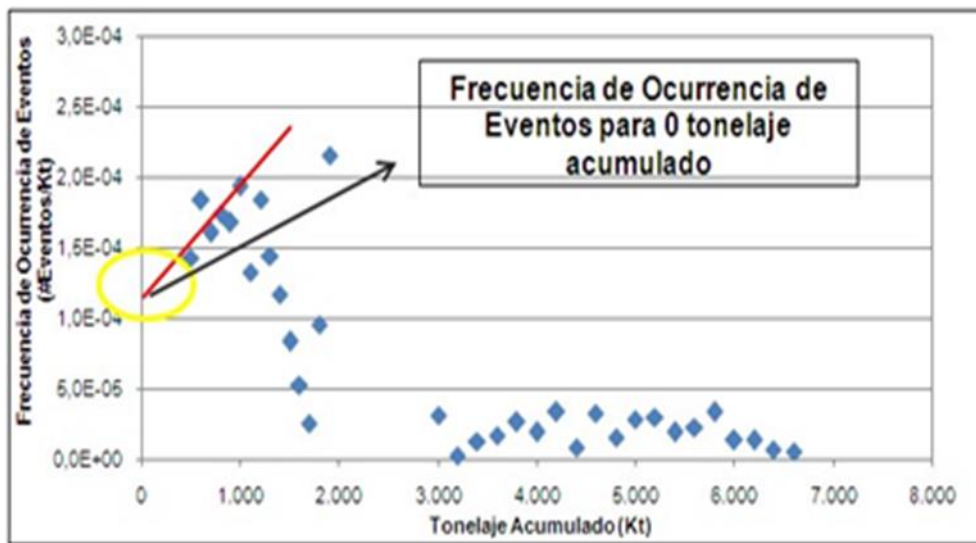
Según lo presentado en el capítulo referente a la confiabilidad aplicada a la planificación minera, las curvas U y PCC son parámetros fundamentales a la hora del cálculo de confiabilidad, para cualquier sistema minero.

Actualmente, el modelo de confiabilidad de la mina PT Freeport DOZ está implementado en la herramienta computacional PC-BC, del software comercial Gemcom, la cual está siendo utilizada por el área de planificación en el cálculo de planes de producción de mediano y largo plazo con el objetivo de conocer y estimar la eventual probabilidad a que éstos se cumplan, según una determinada estrategia de abertura y disposición de infraestructura minera (puntos de extracción, calles, piques).

Sin embargo, la utilización de esta herramienta requiere una reestructuración de la data obtenida de los análisis de productividad e interferencias operacionales. Para nuestro caso de estudio, dicho reordenamiento se refiere específicamente a las curvas U y PCC obtenidas de los piques de traspaso. A continuación, se presentan las consideraciones que se deben tener para la integración de éstas al software:

a) Se define para cada intervalo de madurez, una cierta frecuencia de ocurrencia de eventos, sin embargo, no se considera cuando el tonelaje es cero.

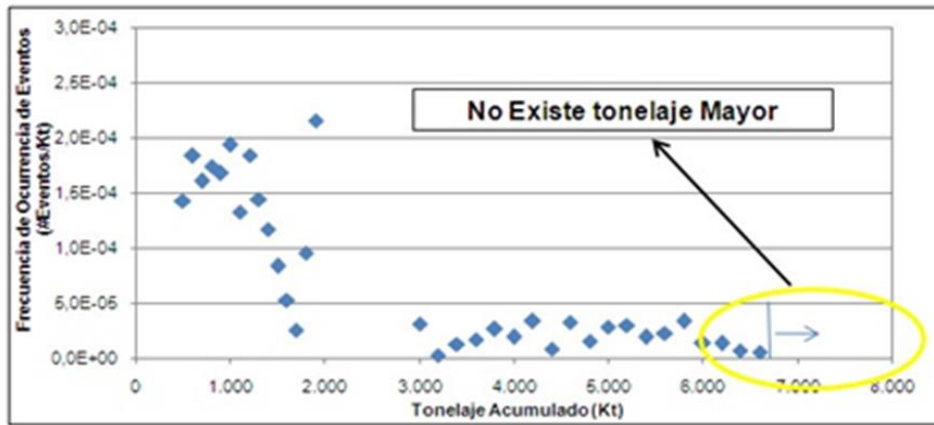
La solución a este problema es tomar los primeros intervalos de madurez, con su respectiva frecuencia de ocurrencia de eventos asociada y graficar con estos la regresión, donde ésta intercepte al eje Y será la frecuencia asociada a cero toneladas.



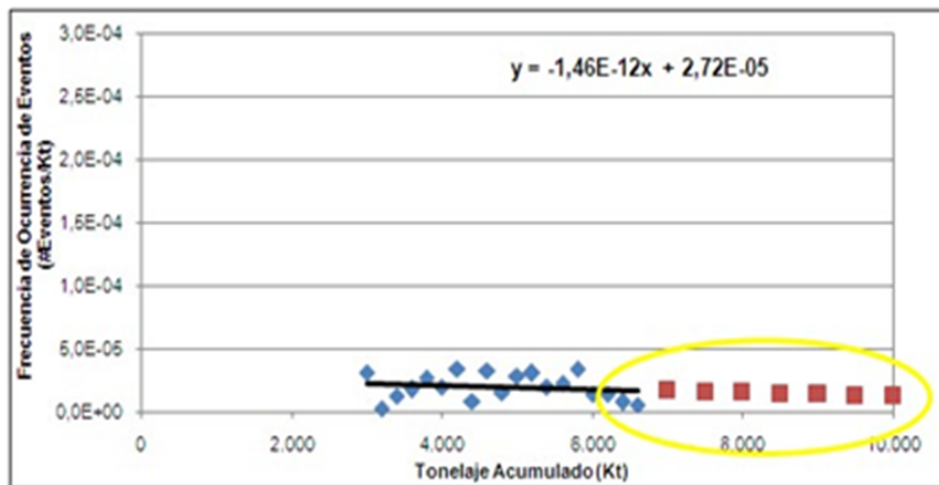
**Figura 66. Ejemplo cálculo de frecuencia para 0 Kt acumulado**

b) Como la Curva U está basada en el tonelaje histórico de una componente, el tonelaje acumulado está limitado, no representando el máximo a extraer. Por ejemplo, si se tiene un pique por el cual han pasado 6,800 Kt (figura 68), la Curva U para los próximos años de este pique no presenta valores asociados.

La solución a este problema es el agrupar los puntos que presenten una tendencia similar, e interpolar ésta según la recta que se obtiene de la regresión.

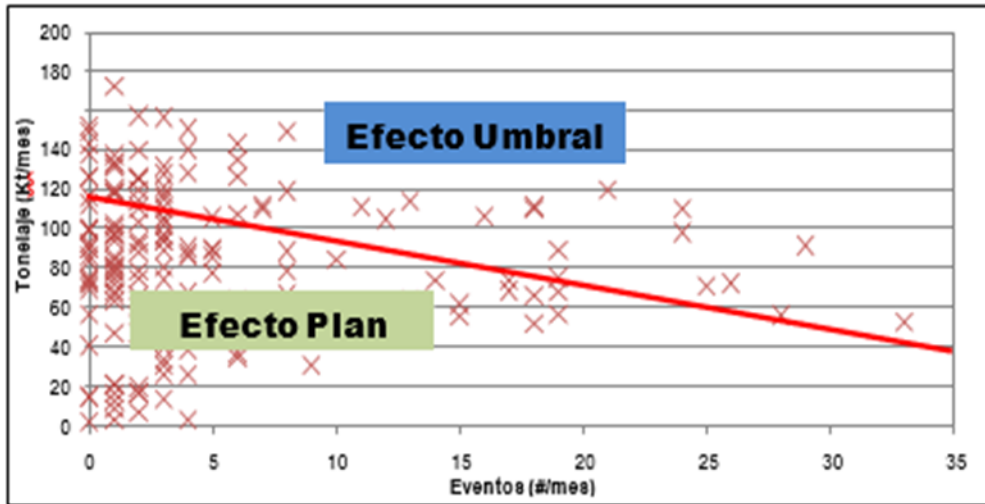


**Figura 67. Ejemplo extrapolación tonelaje acumulado**



**Figura 68. Extrapolación curva U**

- c) Según se mencionó anteriormente, para las PCC la dispersión de tonelajes que existe asociada a cada evento, se debe al efecto plan y al efecto umbral (máximos de extracción). De acuerdo a la teoría de la confiabilidad, el cálculo de ésta para una componente se efectúa conociendo la media y la desviación estándar de los tonelajes, asociados al posible número de eventos entregados por la PCC. El objetivo de la PCC es reportar los tonelajes asociados a cierto número de eventos, al ser poco los datos es imposible la construcción de esta según lo planteado en los antecedentes, por esta razón que se plantea la siguiente solución:



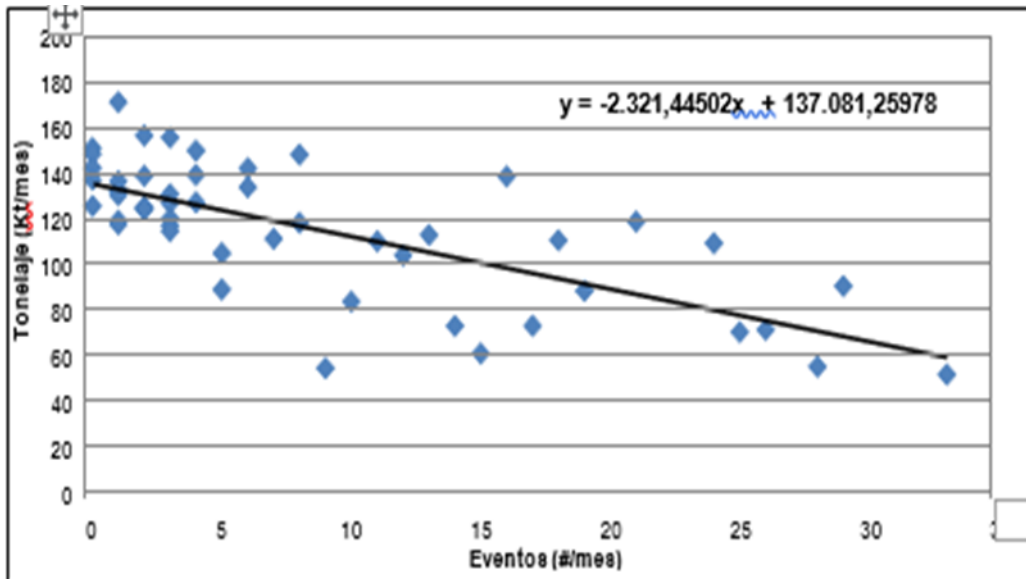
**Figura 69. Efecto plan y efecto umbral**

La solución a lo presentado en la figura 69, es sólo contar con los datos dados por el efecto umbral, el cual se define como el 20 % mayor de los tonelajes asociados a cada evento.

Para el caso en que las mediciones son muy pocas (caso 28 eventos, que tiene sólo un tonelaje asociado), al menos debe reportar una (la mayor) para que represente dicho número de eventos.

Una vez definidos el 20 % mayor para cada evento, se calcula la regresión lineal asociada a todos los puntos ploteados en la PCC (figura 70).

Dicha recta, será la que nos dará los tonelajes a incorporar al modelo de confiabilidad. Por último, la desviación estándar será la calculada con respecto a la regresión, siendo fija para cada uno de los eventos y tonelajes asociados.



**Figura 70. Regresión con respecto al 20 % mayor**

### 3.8. Población y muestra

#### 3.8.1. Población

La población es el conjunto de individuos que comparten por lo menos una característica, sea una ciudadanía común, la calidad de ser miembro de una asociación voluntaria o de una raza, la matrícula en una misma universidad, o similares. (10) Hernández (2014) lo define como un conjunto de elementos del que se busca conocer sus características para validarlas o no.

En este sentido la presente investigación estará conformada por la unidad de producción de Raúl 2 Cía. Minera Condestable S.A. donde se ejecutará el proyecto de diseño de producción con grado de confiabilidad (RCM) método de explotación sublevel stopping tajo Raúl 2.

#### 3.8.2. Muestra

La muestra es una parte pequeña de la población o un subconjunto de esta, que sin embargo posee las principales características de aquella. (11)

Esta es la principal propiedad de la muestra (poseer las principales características de la población) la que hace posible que el investigador, que trabaja con la muestra, generalice sus resultados a la población". (11)

Subgrupo del cual se recolectan datos y debe ser representativo de la población. (11)  
Por lo tanto, la muestra está conformado por el proyecto diseño de producción con grado de confiabilidad (RCM) método de explotación Shirinkage stoping tajo Raúl 2 CIA minera Condestable S.A.

### **3.9. Metodología aplicativa**

- a)** Análisis de la metodología de cálculo actual de la confiabilidad de componentes de infraestructura minera.
  
- b)** Análisis de metodología de conexión entre componentes (principalmente entre niveles de producción y transporte).
  
- c)** Análisis de modelos de confiabilidad actuales (aplicados a la programación de producción).
  
- d)** Formulación matemática del modelo de confiabilidad de programas de producción en sistemas subterráneos complejos.
  
- e)** Especificación de parámetros requeridos por el modelo.
  
- f)** Estudio de caso (DOZ-ESZ PT Freeport Indonesia).
  - ✓ Modelo de conexión entre componentes
  
  - ✓ Obtención y modelación de parámetros requeridos con información operacional histórica
  
  - ✓ Calibración del modelo

✓ Validación del modelo

✓ Confiabilidad del programa de producción para alcanzar 80Ktpd (2008).

**g)** Revisión de resultados

**h)** Conclusiones y recomendaciones

### **3.9.1. Organización de la tesis**

#### **a) Desarrollo sistémico de la investigación**

Sin importar la simpleza o complejidad del sistema de manejo de materiales de una operación de hundimiento por bloques o paneles, este debe hacerse cargo de la ocurrencia de eventos de interferencia en cualquiera de sus partes.

Particularmente, el proceso de fragmentación es fundamental en este tipo de minería dado que una de las principales perturbaciones del sistema minero es su vulnerabilidad a la aparición de rocas de granulometría tal que hacen imposible su transporte y que generan bloqueos en el flujo de mineral a través del sistema.

Estas interferencias operacionales son particulares para cada componente del sistema al igual que sus metodologías de reparación, entre las que se destacan, para minería de Block, Panel Caving y Shirinkage stoping:



**Tabla 18. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de infraestructura minera subterránea y técnicas de reparación**

| Componente             | Interferencia                                  | Solución   |
|------------------------|--|--|
| Puntos de extracción   | Sobretamaño                                    | Perforación y tronadura  |
|                        |  | Detonación de cargas superficiales   |
|                        | Colgadas                                       | Martillos rompedores   |
|                        |  | Perforación y tronadura (dificultad de acceso para colgadas de mucha altura) |
| Cruzados de producción | Compactación de finos                          | Tronadura secundaria   |
|                        | Cierre para reparación de puntos de extracción | Reparación de puntos de extracción   |
|                        | Daño en carpeta de rodado                      | Re pavimentación   |
|                        | Colapsos                                       | Re excavación<br>Pérdida del cruzado   |
| Parrillas              | Sobretamaño                                    | Martillos rompedores   |
|                        | Rotura de parrilla                             | Cambio de componentes  |
| Piques de traspaso     | Colgadas                                       | Perforación y tronadura (dificultad de acceso)                               |
|                        |  | Detonación de cargas superficiales (dificultad de acceso)                    |
|                        | Sobretamaño en parrillas                       | Martillos picadores  |
|                        | Compactación de finos                          | Tronadura secundaria   |
| Buzones                | Fallas mecánicas variadas                      | Reparación mecánica  |
| Cruzados de transporte | Equipos detenidos                              | Remolcar equipos<br>Reparación in-situ                                       |
|                        | Daño en carpeta de rodado                      | Re pavimentación   |
|                        | Cierre para reparación de buzones              | Reparación de buzones  |

**Tomado de Le Faux, 1999**

## **CAPÍTULO IV**

### **DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Simulaciones**

El objetivo principal de la construcción del modelo de simulación es analizar el impacto que tiene en la productividad de una calle de producción, las diferentes frecuencias de ocurrencia de eventos que suceden en los piques de traspaso. Éstas están dadas por la Curva U obtenida para la mina DOZ. La variación en la producción se verá reflejada en la PCC que se obtiene para la calle. El Software comercial a utilizar es Arena (Rockwell).

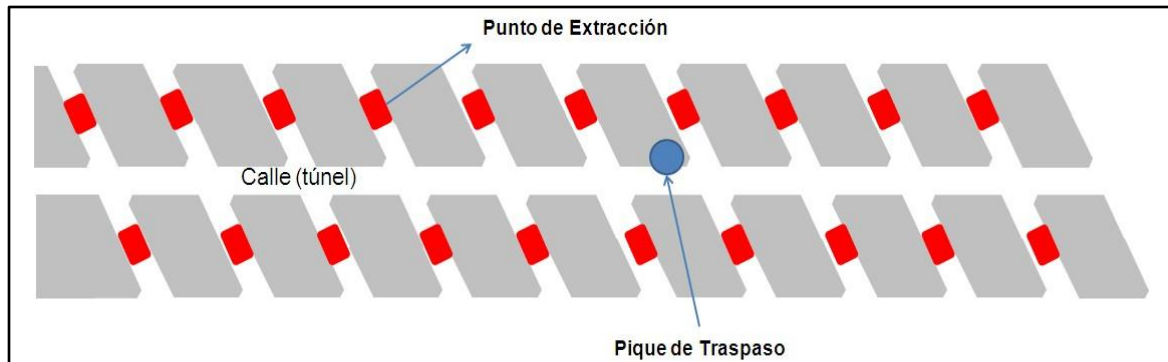
El modelo de simulación implementado para el estudio del impacto de las interferencias operacionales en la productividad de una calle de producción, se describe de manera general, como una simulación computacional estocástica de eventos discretos. Los detalles de funcionamiento específico e implementación se describen en los siguientes títulos.

#### **4.2. Construcción del modelo**

Las componentes de estructura implementadas en el modelo de simulación son las siguientes:

- Puntos de extracción: 20 puntos de extracción que están ligados al túnel de producción.

- Calles de producción: una por la cual el mineral es transportado hacia el pique de traspaso.
- Piques de traspaso: uno en el cual el mineral extraído y transportado o vaciado.



**Figura 71. Configuración tipo modelo de simulación.**

Las entidades operativas consideradas en el modelo de simulación, que se movilizan dentro de la infraestructura antes mencionada, son las siguientes:

- Mineral
- Equipos LHD

Es preciso destacar ciertos aspectos, que dicen relación a las cantidades y capacidades de las entidades operativas disponibles durante el funcionamiento del modelo. Estos se especifican a continuación:

- El flujo entrante de mineral al sistema se realiza a través de los puntos de extracción. Este debe ser tal, que siempre exista material disponible para cargar en el punto, si es que no está detenido por algún evento de interferencia.
- Existe un equipo LHD por cada cruzado de producción. Cada unidad queda especificada por su velocidad, la capacidad de su balde y su cruzado correspondiente.

- El número de cuadrillas de reducción secundaria puede modificarse a voluntad, previo a ejecutarse la simulación, con el objetivo de estudiar su impacto en la productividad del sistema. Cada cuadrilla queda especificada por el tiempo unitario necesario para resolver tipos específicos de interferencias en el sistema, a nivel de puntos de extracción y piques de traspaso.

### **4.3. Descripción modelo**

Durante la ejecución de la simulación, el estado de las componentes y entidades se mantiene constante, lo único que varía es la frecuencia de ocurrencia de eventos de los piques. Cualesquiera sean estas condiciones, son específicas del modelo de simulación utilizado.

#### **4.3.1. Puntos de extracción**

##### **Tiempo de llegadas**

Cada punto de extracción contiene unidades de mineral disponibles para ingresar al sistema en lapsos específicos (tiempo entre llegadas, para simulación de eventos discretos), que se detallan previo a la ejecución del experimento. Este periodo de tiempo puede ser constante o responder a una distribución de probabilidades.

Cualquiera sea la opción escogida, es preciso comprender que este tiene directa relación con la productividad del sistema completo, pues nunca podrán salir del sistema un mayor número de unidades que las que alguna vez ingresaron.

Por lo anterior, este tiempo entre llegadas debe ser tal, que en un punto de extracción exista material para cargar cada vez que el equipo LHD acceda al punto, si es que este no está bloqueado por algún tipo de interferencia operacional.

Con lo anterior, puede asegurarse que la productividad total del sistema no se verá afectada por restricciones que dependen únicamente del tipo de simulación utilizada y no del funcionamiento propio del sistema modelado.

Cada vez que desde el punto de extracción se extrae una baldada de mineral, este automáticamente genera otra, la cual está disponible para ser extraída nuevamente (salvo que suceda una interferencia operacional), existiendo siempre mineral disponible una vez que el LHD ha vaciado al pique.

Al comienzo de la simulación, el LHD se encuentra en el pique de traspaso, con el objetivo de asegurar que para cuando esta comienza existan entidades (baldadas de mineral) en todos los puntos de extracción.

### Interferencias operacionales

Éstas serán incluidas en el modelo de simulación, discretizando la Curva U de los puntos de extracción. A continuación, se presenta dicho proceso:

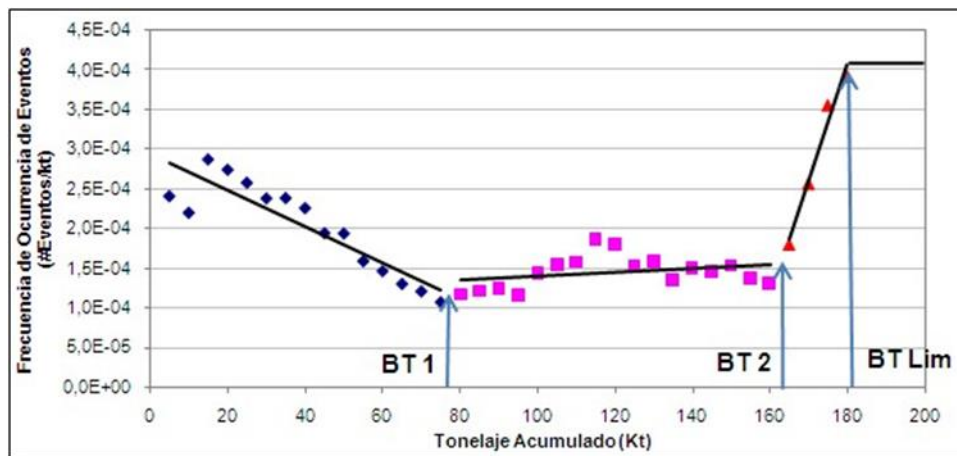


Figura 72. Discretización Curva U puntos de extracción

La primera parte de la Curva U (entre 0 y BT1) que se introdujo al modelo de simulación como la siguiente recta:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = a1 * \text{Ton. Acum.} + b1$$

Donde:

- BT1 = 70128.4525.
- a1 = -2.3099e-9.
- b1 = 0.0002948.

La segunda parte de la Curva U (entre BT1 y BT2) se introdujo al modelo de simulación como la siguiente recta:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = a2 * \text{Ton. Acum.} + b2$$

Donde:

- BT2 = 162919.5718
- a1 = 0.001373
- b1 = 3.4099e-9

La tercera parte de la Curva U (entre BT1 y BT2) se introdujo al modelo de simulación como la siguiente recta:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = a3 * \text{Ton. Acum.} + b3$$

Donde:

- BT Lim = 179603.1327.
- a3 = 1.4704e-8.
- b3 = -0.0022409.

La cuarta parte de la Curva U (entre BT Lim e infinito) se introduce como:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = 0.0004$$

Cada vez que el equipo LHD retira una baldada de mineral desde un punto de extracción, puede cuantificarse su tonelaje asociado y dejar registro de cuántas toneladas se han extraído desde dicho punto de manera acumulativa, desde la última vez que se registró un evento de interferencia en el mismo o desde el inicio del experimento de simulación, para el caso del primer incidente.

Si el tonelaje acumulado extraído por el punto de extracción específico es mayor o igual al tonelaje entregado por el muestreo de la distribución, entonces el punto falla

queda inhabilitado para que el equipo LHD pueda cargar material desde éste, hasta que el problema sea solucionado.

## **Equipo LHD**

Los equipos LHD son especificados, mediante la capacidad de su balde en unidades volumétricas y su velocidad. Éstos son los encargados de retirar el mineral, desde los puntos de extracción y vaciarlo en los piques de traspaso. Su funcionamiento se modela con las siguientes restricciones:

- Solo puede transitar un equipo LHD a la vez por calle de producción.
- No se consideran fallas mecánicas de estos. Lo anterior se debe a que el impacto generado por este tipo de interferencias queda fuera de los alcances de este estudio.
- Asignación de puntos de extracción uniforme, es decir, el LHD no debe privilegiar ningún punto de extracción disponible por sobre otro.

Resulta fundamental considerar una estrategia que no privilegie ningún punto sobre otro, al momento de realizar la extracción.

Considerando además que el estado de los puntos puede cambiar a lo largo de la simulación entre disponible para cargar y no disponible para cargar (cuando se ve afectado por algún evento operacional).

Para solucionar lo expresado anteriormente, se le asigna a cada unidad material, al momento de ser creada por el sistema, un valor de prioridad para el carguío obtenido de una distribución de probabilidades uniforme, una vez ocurrido esto, la entidad material solicita al equipo de carguío para su extracción.

Cada vez que el LHD tenga que decidir desde que punto extraer material, tomará en cuenta las prioridades de cada unidad material, debido al modo de asignación de

prioridades, ningún punto de extracción tendrá siempre prioridad sobre otro, con lo que se obtiene el resultado deseado.

Debe considerarse además que los puntos de extracción fallados son incapacitados de crear unidades de mineral, por lo que el LHD no accederá a éstos debido a que ninguna entidad de mineral lo ha solicitado.

### **Ciclo de carguío**

En el modelo de simulación utilizado, el ciclo de carguío fue construido considerando los siguientes aspectos:

- La velocidad del equipo LHD es constante e igual en los casos en que el equipo transite cargado o descargado.
- La distancia de transporte se especifica entre cada punto y el pique de traspaso.
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en realizar el carguío de mineral.
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en realizar la descarga de mineral de mineral en el pique de traspaso.
- Cualquier tiempo de maniobras extra puede incorporarse como una demora adicional en el tiempo de cargado o descarga, que puede ser una distribución de probabilidades o una constante.

### **Mineral**

La unidad básica de mineral en el sistema es una baldada de LHD, que posee los siguientes atributos:



- Tonelaje: calculado como el producto de la densidad del material a cargar por la capacidad del balde del LHD por el factor de llenado del balde (que puede especificarse como una distribución de probabilidades o como una constante).
- Prioridad para el carguío: asignado aleatoriamente según una distribución de probabilidades uniforme para evitar distorsiones en la asignación del carguío del equipo LHD.
- Origen: especifica el punto de extracción desde donde se extrajo la unidad mineral. Su finalidad es corroborar que ningún punto de extracción esté siendo sistemáticamente preferido para el carguío.

### **Cuadrillas de reducción secundaria**

Las cuadrillas de reducción secundaria son las encargadas de solucionar los eventos de interferencia operacionales consideradas a nivel de puntos de extracción, es decir su misión es modificar el estado de dicha componente desde no disponible a disponible.

Su operación está restringida principalmente a que no pueden acceder a puntos detenidos si es que el LHD del cruzado de producción este operativo, por lo que resulta preciso detallar las estrategias consideradas para el cierre de calles, de modo que la cuadrilla pueda operar adecuadamente.

### **Reparación de puntos de extracción**

Debido a que el sistema minero, a nivel de puntos de extracción es redundante, resulta necesario definir una estrategia que indique el número de puntos detenidos por cruzados de producción para tomar la decisión de su cierre.

Cada vez que un punto de extracción es afectado por una interferencia operativa, incrementa en uno una variable acumulativa que especifica el número de puntos fallados del cruzado de producción específico. Los puntos detenidos permanecen en estado *stand by* hasta que un evento de interferencia de un nuevo punto genera que esta

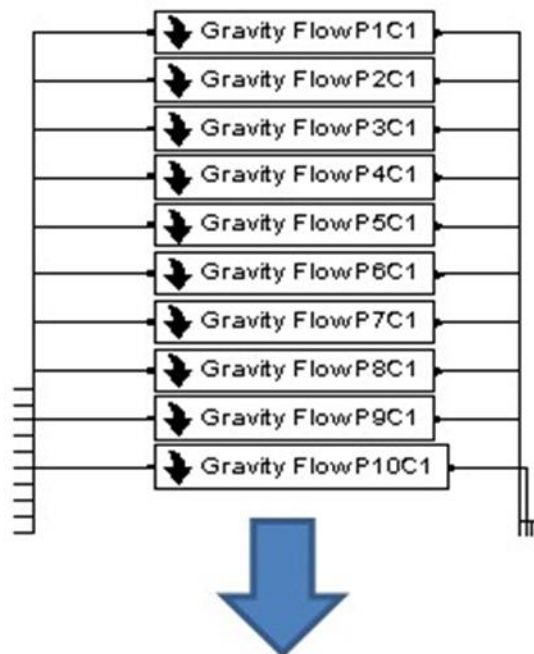
variable acumulativa sobrepase el número crítico de puntos fallados para tomar la decisión del cierre del cruzado completo.

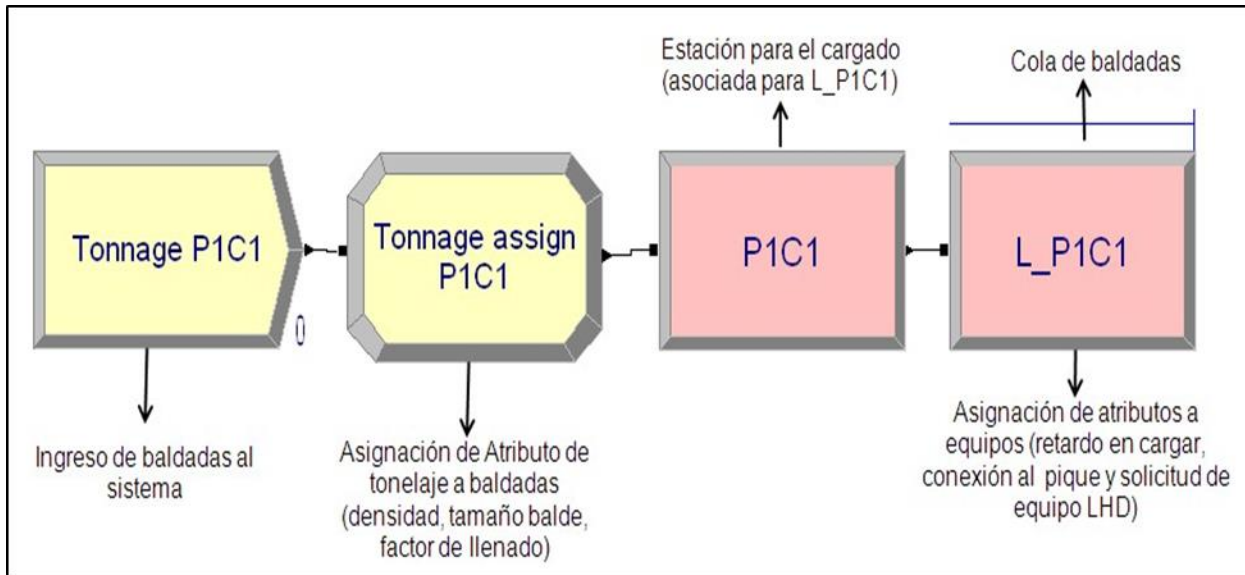
En este momento el equipo LHD se detiene y se permite el acceso de la cuadrilla, que tomará un tiempo determinado en resolver los problemas de cada punto. La cuadrilla no se retira del cruzado de producción hasta que todos los puntos de extracción estén nuevamente disponibles para cargar.

### Modelo puntos de extracción

Según lo mencionado anteriormente, el modelo construido en el software se presenta de la siguiente manera:

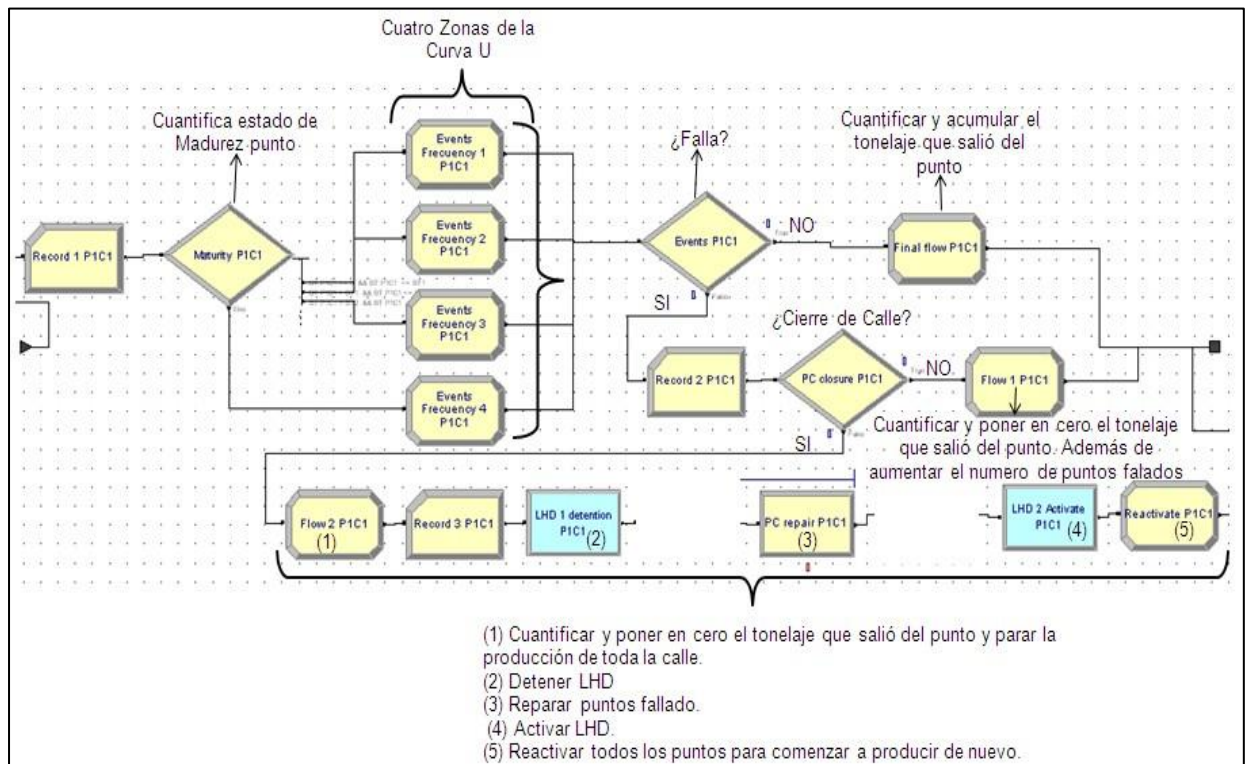
- Punto de extracción: ejemplo para un punto de extracción, para los demás es análogo.





**Figura 73. Modelo en Arena punto de extracción**

- Interferencias operacionales. Puntos de extracción:  
Se presenta en submodelos, se presenta uno siendo los demás análogos



**Figura 74. Interferencias operacionales puntos de extracción**

### **4.3.2. Piques de traspaso**

La función del pique de traspaso es recibir el material proveniente de los puntos de extracción, que ha sido previamente transportado por el equipo LHD. Se considera éste como un continuo que recibe mineral.

No se considera un nivel de transporte, ya que el objetivo principal de las simulaciones es cuantificar el efecto en la productividad de la calle para diversas frecuencias de ocurrencias de eventos en los piques.

### **Interferencias operacionales**

Cualquier tipo de eventos de interferencia a nivel de piques de traspaso puede entenderse como una Curva U. Nuevamente, al igual que el caso de los puntos de extracción, la frecuencia de ocurrencia de eventos depende del tonelaje movilizado a través del pique y no del tiempo cronológico de operación de éste.

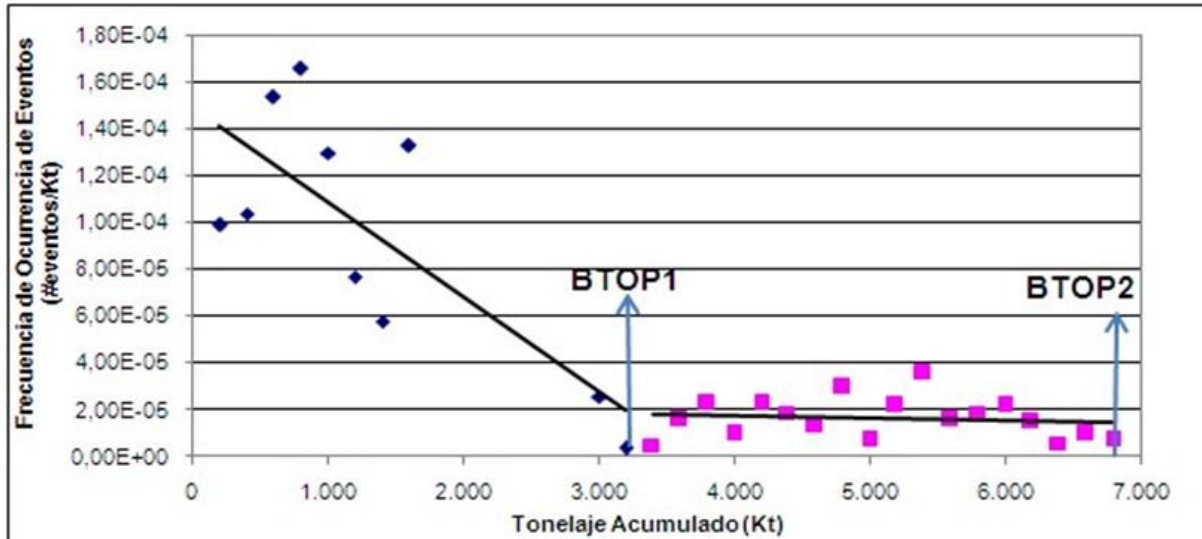
La forma de incorporar los eventos de interferencia del pique de traspaso es similar al de los puntos de extracción: Cada vez que un LHD vacía mineral, puede cuantificarse su tonelaje asociado y dejar registro de cuántas toneladas han pasado por el pique respectivo, de manera acumulativa, desde la última vez que se registró un evento de interferencia en el mismo o desde el inicio del experimento de simulación, para el caso del primer incidente.

Luego, si el tonelaje acumulado extraído por el pique específico es mayor o igual al tonelaje entregado por el muestreo de la distribución, entonces el pique falla, es decir, el flujo de material a través de éste se interrumpe, dejando las calles de producción detenidas, debido a que el pique debe repararse.

La Curva U de la mina se discretiza en:

- Entre 0 y BTOP1.
- Entre BT1 y BTOP2.
- Entre BTOP2 e infinito.

El próximo gráfico indica la ubicación de estos valores:



**Figura 75. Discretización Curva U piques de traspaso**

La primera parte de la Curva U (entre 0 y BTOP1) se introdujo al modelo de simulación como la siguiente recta:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = \text{opa1} * \text{Ton. Acum.} + \text{opb1}$$

Donde:

- BTOP1 = 3244740.3764.
- opa1 = -4.029e-11.
- opb1 = 0.000149.

La segunda parte de la Curva U (entre BTOP1 y BTOP2) se introdujo al modelo de simulación como la siguiente recta:

$$\text{Frecuencia de ocurrencia de eventos} = \text{opa2} * \text{Ton. Acum.} + \text{opb}$$

Donde:

- BTOP2 = 8000000.

- opa2= -9.44e-13.
- opb2= 0.00002143

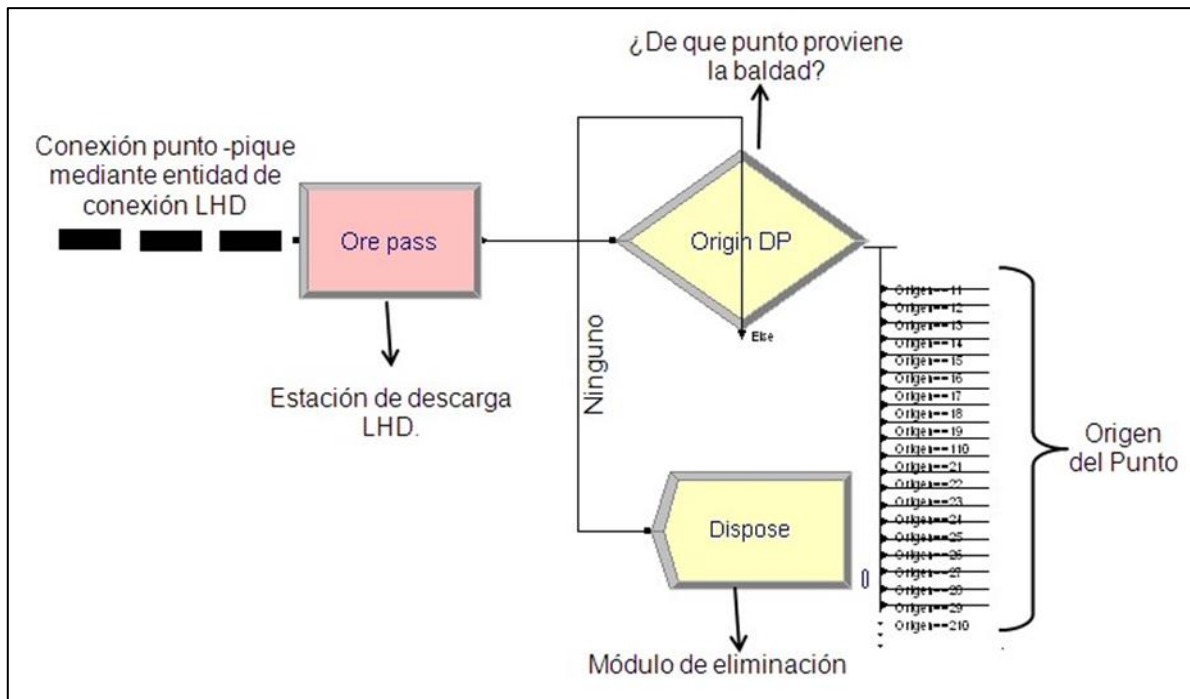
La tercera parte de la Curva U (entre BTOP2 e infinito) se introduce como:

$$\text{Events Frequency} = 1.3857e-5$$

### Modelo piques de traspaso

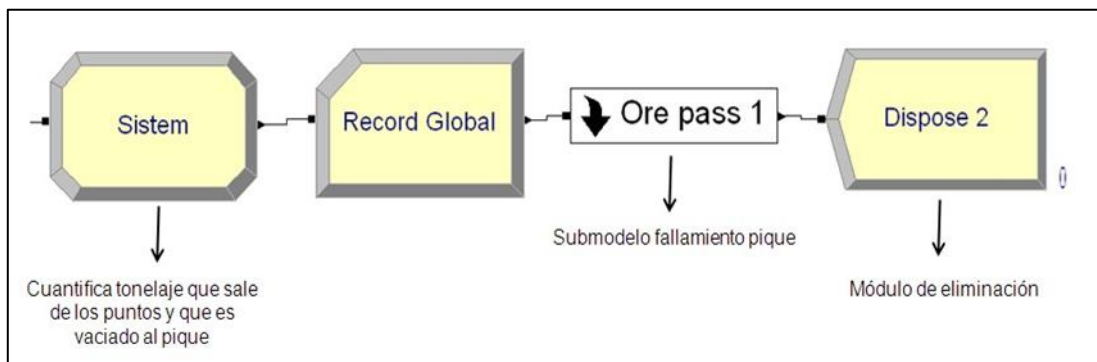
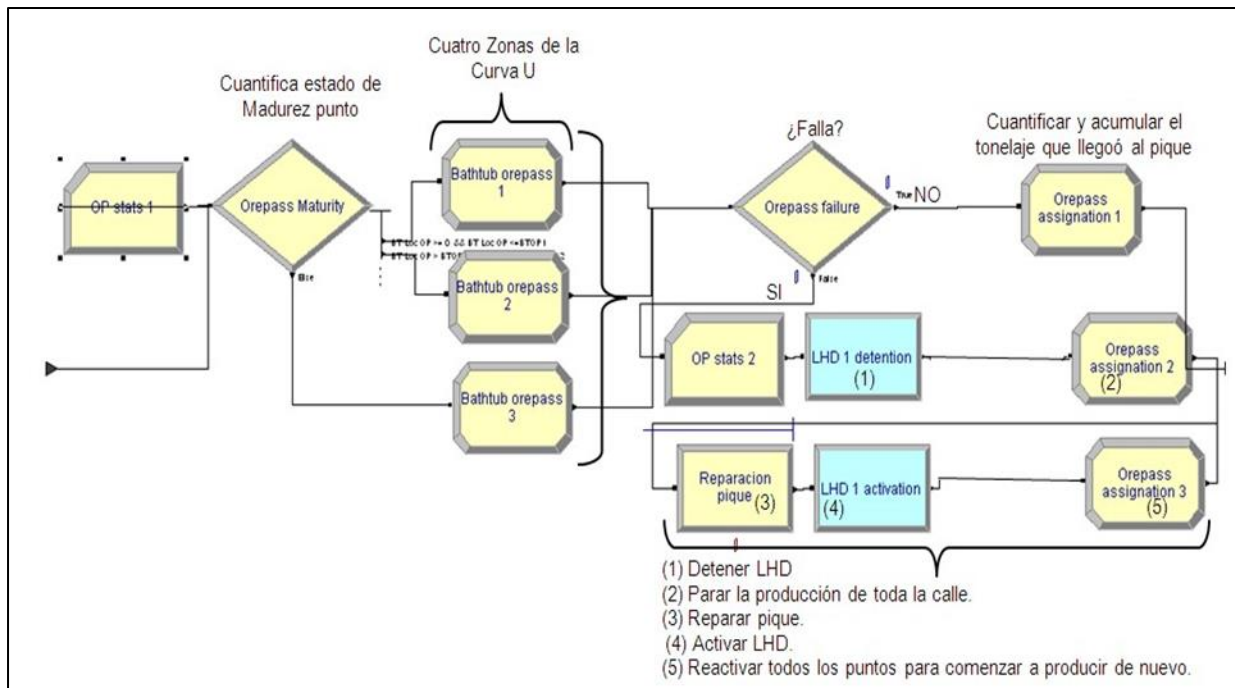
Según lo mencionado anteriormente el modelo construido en el software se presenta de la siguiente manera:

- Pique de traspaso



**Figura 76. Modelo en arena pique de traspaso**

- Interferencias operacionales piques de traspaso: se presenta en submodelos, siendo simular la falla de los puntos de extracción.



**Figura 77. Cuantificación tonelaje vaciado al pique y modo de falla**

### 4.3.3. Parámetros del modelo

En el modelo de simulación implementado existen variables relacionadas con el funcionamiento del sistema minero cuyo valor permanece constante durante la ejecución de un experimento dado y que además se consideraron invariantes para todos los experimentos realizados.

Debido a que no resulta de interés para este estudio analizar su impacto sobre la productividad del sistema minero o bien sus valores son relativamente constantes en cada caso analizado. Estas variables de enuncian y especifican a continuación:

**Tabla 19. Infraestructura y equipos**

| Infraestructura y equipos      |        |       |
|--------------------------------|--------|-------|
| Ítem                           | Unidad | Valor |
| Puntos de Extracción por Panel | #      | 20    |
| Cuadrillas de Reducción        | #      | 1     |
| Piques por Panel               | #      | 1     |
| LHDs por Panel                 | #      | 1     |

**Tabla 20. Especificación de equipos**

| Especificación de equipos |                          |                 |              |
|---------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|
| Equipo                    | Item                     | Unidad          | Valor        |
|                           | Velocidad                | m/min           | 150          |
|                           | Tamaño Balde             | yd <sup>3</sup> | 7            |
| Cuadrillas de reducción   | Tiempo de Reparación por | min             | TRIA(30,40,5 |
|                           | Tiempo de Ventilación    | min             | 50           |
|                           | Estrategia de Cierre de  | #               | 10           |

**Tabla 21. Distancias**

| Distancias         |                     |           |
|--------------------|---------------------|-----------|
| Estación de inicio | Estación de término | Distancia |
| P1C1               | LP                  | 89        |
| P2C1               | LP                  | 96        |
| P3C1               | LP                  | 67        |
| P4C1               | LP                  | 85        |
| P5C1               | LP                  | 54        |
| P6C1               | LP                  | 65        |
| P7C1               | LP                  | 32        |
| P8C1               | LP                  | 45        |
| P9C1               | LP                  | 19        |
| P10C1              | LP                  | 23        |
| P1C2               | LP                  | 13        |
| P2C2               | LP                  | 14        |
| P3C2               | LP                  | 32        |
| P4C2               | LP                  | 24        |
| P5C2               | LP                  | 52        |
| P6C2               | LP                  | 41        |
| P7C2               | LP                  | 67        |
| P8C2               | LP                  | 59        |
| P9C2               | LP                  | 89        |
| P10C2              | LP                  | 72        |



**Tabla 22. Parámetros corridos**

| Parámetros corridos      |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| Ítem                     | Unidad | Valor |
| Replicaciones            | #      | 5     |
| Largo replicaciones      | días   | 1260  |
| Horas operativas por día | horas  | 15    |

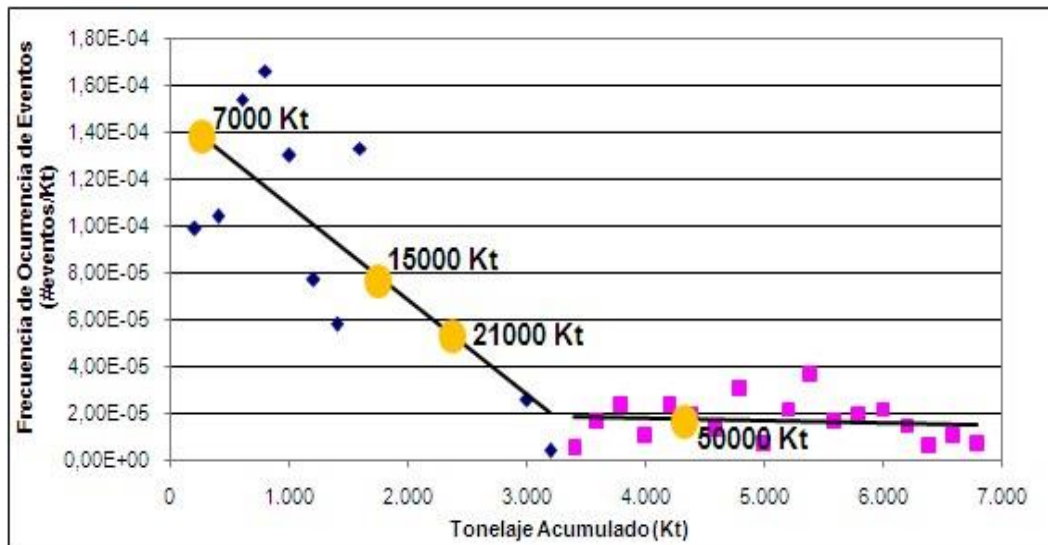
**Tabla 23. Discretización Curva U**

| Discretización Curva U |                    |            |
|------------------------|--------------------|------------|
|                        | BT1                | 70,128.45  |
|                        | BT2                | 162,919.57 |
|                        | BTLimi             | 179,603.13 |
| Puntos de extracción   | a1                 | -2.31E-09  |
|                        | b1                 | 2.95E-04   |
|                        | a2                 | 2.36E-10   |
|                        | b2                 | 1.16E-04   |
|                        | a3                 | 1.47E-08   |
|                        | b3                 | -2.24E-03  |
|                        | Piques de traspaso | BTOP1      |
| BTOP2                  |                    | 8000000.00 |
| aop1                   |                    | -4.03E-11  |
| bop1                   |                    | 1.49E-04   |
| aop2                   |                    | -9.44E-13  |
| bop2                   |                    | 2.14E-05   |

#### 4.3.4. Parámetros variables entre simulaciones

Las variables de entrada al modelo de simulación son las que cambian de un experimento a otro, con el fin de analizar su impacto en la productividad del sistema minero.

La única variable que tendrá el modelo es la frecuencia de ocurrencia de eventos en los piques de traspaso, la cual es fija y los valores asociados a estas están dados por la Curva U obtenida de la mina. La Discretización se presenta a continuación:



**Figura 78. Discretización Curva U mina, para obtener tonelajes entre eventos**

Según lo presentado en la figura 78 se determinan los siguientes escenarios de simulación:

**Tabla 24. Escenarios de simulaciones**

|          | TEE (t) |       |        |        |        |
|----------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Modelo   | 0       | 7,000 | 15,000 | 21,000 | 50,000 |
| 1OP_1LHD | 1       | 2     | 3      | 4      | 5      |

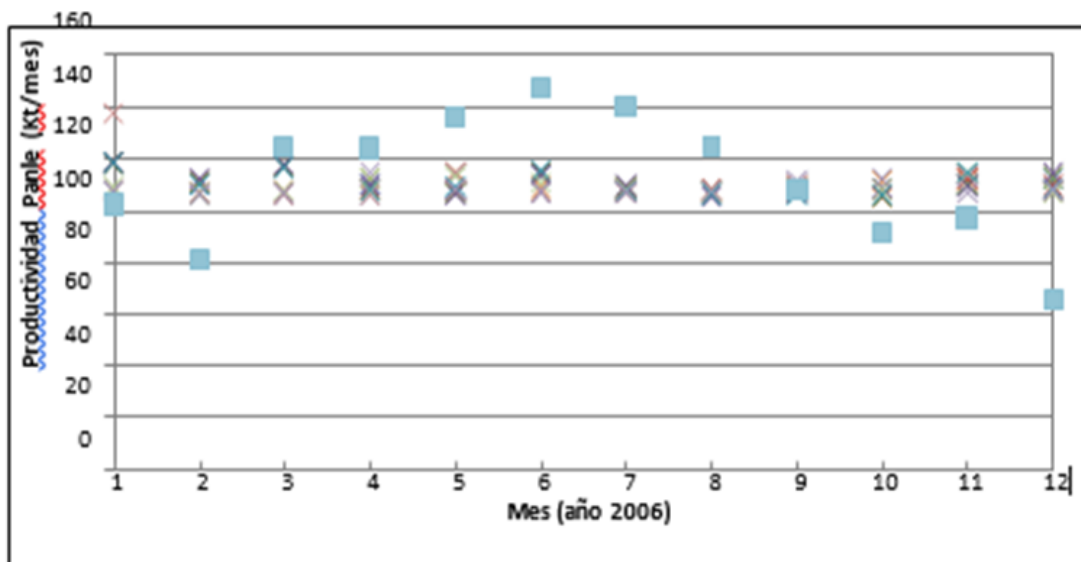
De acuerdo a lo mencionado en la tabla 24. Escenarios de simulaciones, son 5 las simulaciones a realizar.

#### 4.4. Validación del modelo de simulación

Con el objetivo de validar el modelo de simulación, es decir, ajustar las variables del sistema para que sus resultados sean similares a los obtenidos en la realidad se procederá de la siguiente manera:

- Buscar en la base de datos de extracción histórica de la mina un cruzado de producción. Lo anterior se refiere a que exista un número de puntos de extracción adecuado, para no subestimar las capacidades productivas.
- Adaptar consecuentemente el modelo de simulación para que su infraestructura considerada sea similar a aquella desde donde se obtiene la información para la validación.
- Realizar varias corridas en el modelo de simulación ajustando las variables del sistema con el fin de obtener resultados similares a los obtenidos del análisis de la información histórica.

El periodo utilizado para validar el sistema corresponde a la producción extraída desde el 1 de enero de 2006 hasta el 31 de diciembre del mismo año. Los parámetros de entrada son los que se presentan en la tabla 19, salvo el número de puntos, las distancias punto de extracción- pique de traspaso y la madurez que presenta cada punto. Como resultado de la validación del modelo se obtuvieron los siguientes resultados:



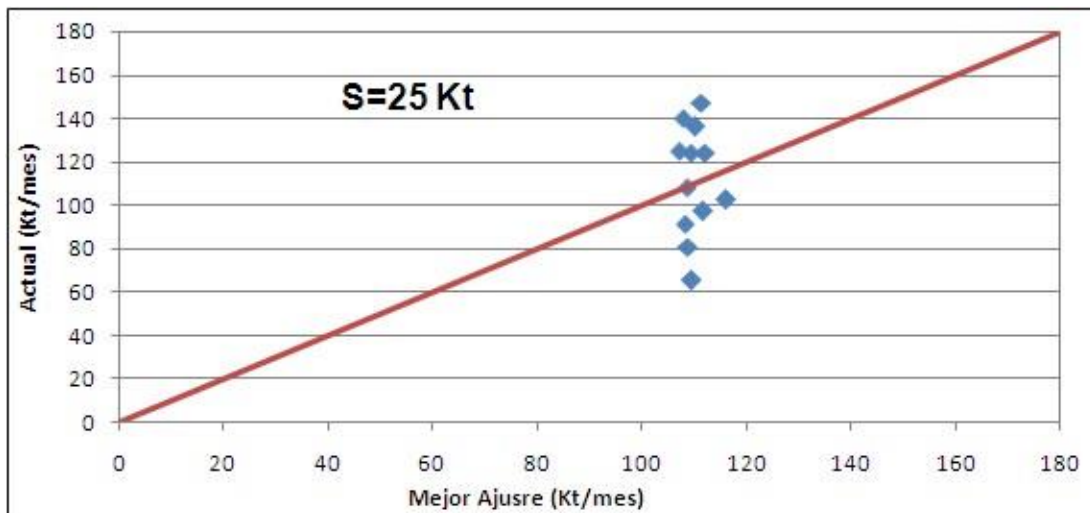
**Figura 79. Resultados de validación**

Para construir la gráfica anterior se realizaron 10 replicaciones de 1 año de duración cada una en el modelo de simulación y luego se identificó la productividad del panel de producción obtenida para cada mes (los primeros 30 días corresponden a enero, los siguientes a febrero y así sucesivamente).

Las X corresponden a una replicación específica, los cuadrados celestes corresponden a la productividad observada en el periodo 2006. Claramente la productividad simulada no es la misma para cada simulación lo que se puede explicar por:

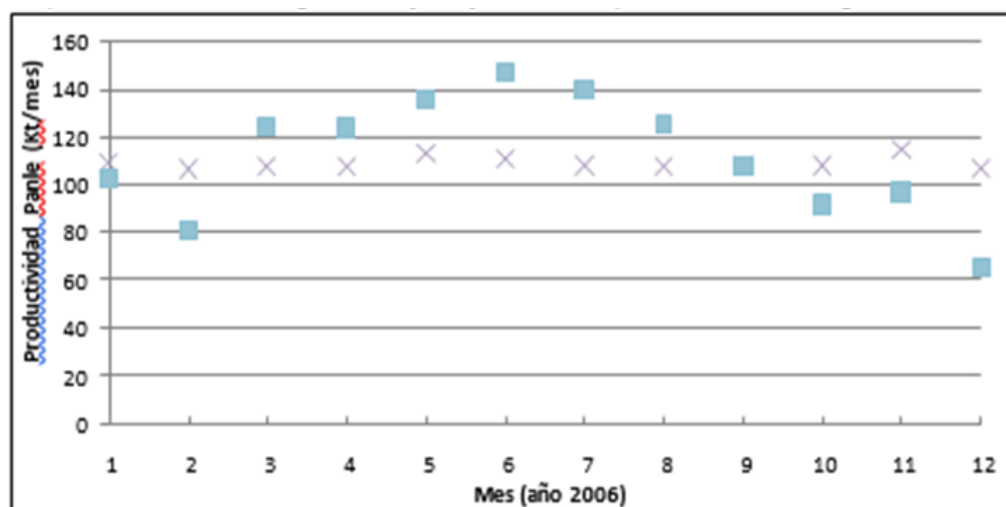
- Distancias pique – punto pueden variar de acuerdo a la medición realizada
- Velocidad LHD no es fija
- Disponibilidad LHD no es fija
- Variación de tonelaje transportado en el balde del LHD

Sin embargo, puede observarse que para casi todos los meses existe una replicación que lograr reproducir la productividad real obtenida o acercarse a ella. El siguiente gráfico muestra la dispersión existente entre la productividad real y mejor caso de las replicaciones el cual se detalle:



**Figura 80. Dispersión entre tonelaje actual y mejor ajuste de las replicaciones**

Donde S mide las diferencias entre la identidad y las observaciones, por lo que permite cuantificar de manera acertada la calidad del ajuste. El valor de s anterior corresponde a un 12 % de la productividad mensual promedio actual obtenida en periodo 2006. Luego el mejor ajuste se representa de la siguiente manera:



**Figura 81. Resultado del mejor ajuste**

Entonces, se procede a realizar las simulaciones en los distintos escenarios anteriormente planteados.

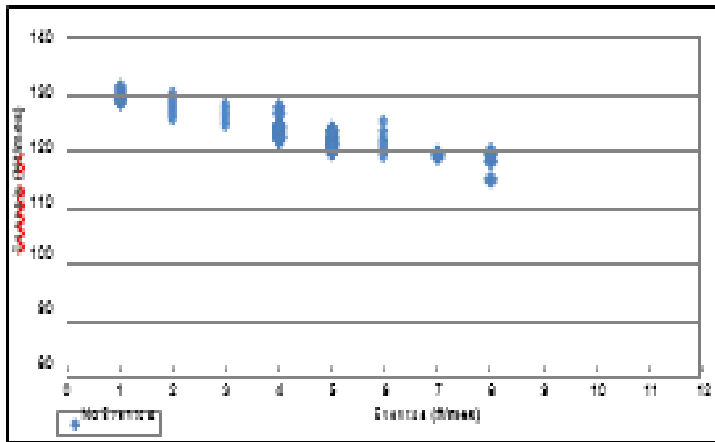
## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los diversos escenarios de simulaciones, los parámetros de entrada son los presentados en las Tablas 19 al 23, salvo la Discretización de la Curva U, ya que el tonelaje entre eventos de los piques de traspaso será fijo, pero el cual variará de simulación en simulación:

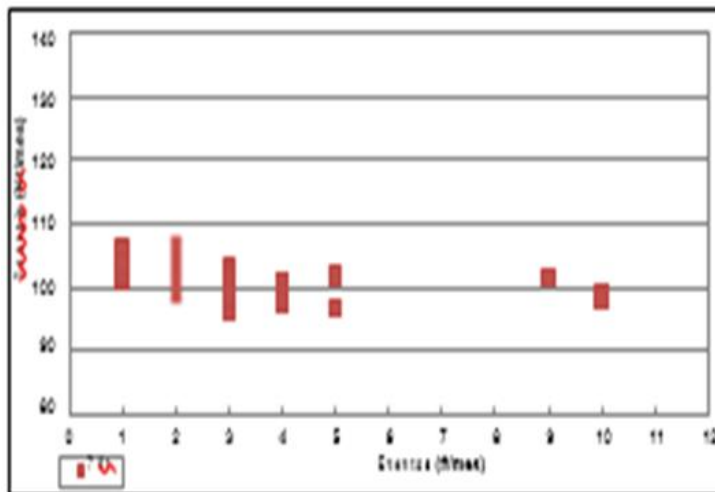
**Tabla 25. *Parámetros variables en la simulación***

| Infraestructura    | Simulación       | Kt |
|--------------------|------------------|----|
| Piques de traspaso | Simulación 1 TEE | 0  |
|                    | Simulación 2 TEE | 7  |
|                    | Simulación 3 TEE | 15 |
|                    | Simulación 4 TEE | 21 |
|                    | Simulación 5 TEE | 50 |



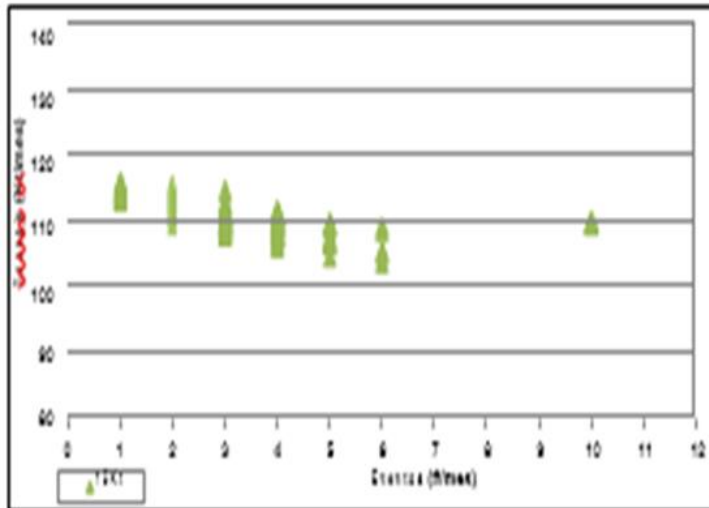
| Tonelaje     |         | Eventos      |     |
|--------------|---------|--------------|-----|
| Media (t)    | 123,535 | Media (#)    | 4   |
| Dev Est. (t) | 3,515   | Dev Est. (#) | 2   |
| Mínimo (t)   | 113,870 | Mínimo (#)   | 1   |
|              |         |              |     |
|              |         |              |     |
| Nº Reg.      | 210     | Nº Reg.      | 210 |

Figura 82. PCC y estadísticas básicas no eventos



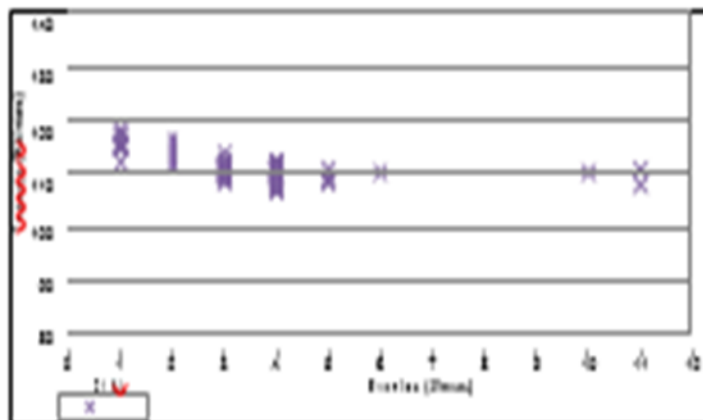
| Tonelaje     |         | Eventos      |     |
|--------------|---------|--------------|-----|
| Media (t)    | 100,932 | Media (#)    | 2   |
| Dev Est. (t) | 1,873   | Dev Est. (#) | 1   |
| Mínimo (t)   | 98,395  | Mínimo (#)   | 1   |
| Máximo (t)   | 106,734 | Máximo (#)   | 10  |
|              |         |              |     |
| Nº Reg.      | 210     | Nº Reg.      | 210 |

Figura 83. PCC y estadísticas básicas eventos cada 7kt



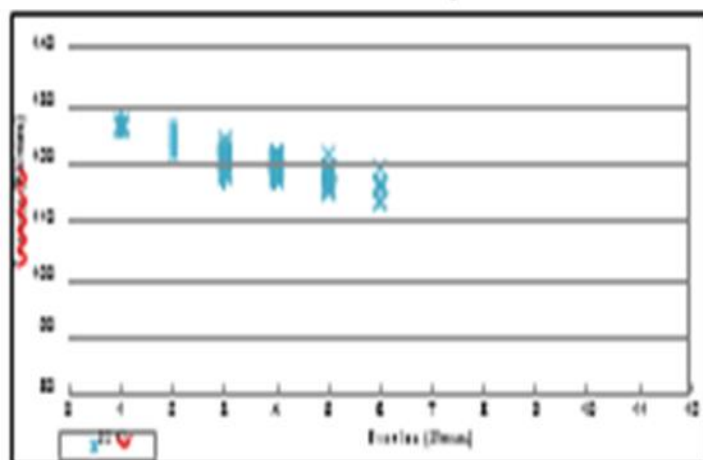
| Tonelaje     |         | Eventos      |     |
|--------------|---------|--------------|-----|
| Media (t)    | 112,380 | Media (#)    | 3   |
| Dev Est. (t) | 2,444   | Dev Est. (#) | 1   |
| Mínimo (t)   | 105,032 | Mínimo (#)   | 1   |
| Máximo (t)   | 117,093 | Máximo (#)   | 10  |
|              |         |              |     |
| Nº Reg       | 210     | Nº Reg       | 210 |

Figura 84. PCC y estadísticas básicas eventos cada 15kt



| Tonelaje     |         | Eventos      |     |
|--------------|---------|--------------|-----|
| Media (t)    | 115,511 | Media (#)    | 3   |
| Dev Est. (t) | 2,233   | Dev Est. (#) | 1   |
| Mínimo (t)   | 110,428 | Mínimo (#)   | 1   |
|              |         |              |     |
| Nº Reg       | 210     | Nº Reg       | 210 |

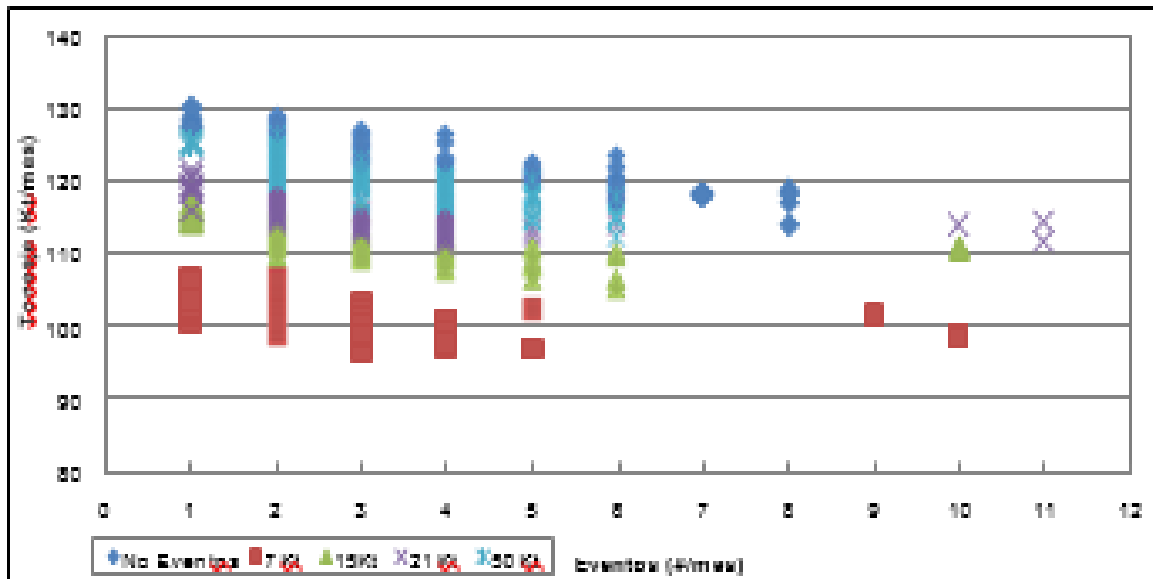
Figura 85. PCC y estadísticas básicas eventos cada 21kt



| Tonelaje     |         | Eventos      |     |
|--------------|---------|--------------|-----|
| Media (t)    | 120,351 | Media (#)    | 3   |
| Dev Est. (t) | 2,813   | Dev Est. (#) | 1   |
| Mínimo (t)   | 112,160 | Mínimo (#)   | 1   |
| Máximo (t)   | 126,397 | Máximo (#)   | 6   |
|              |         |              |     |
| Nº Reg       | 210     | Nº Reg       | 210 |

Figura 86. PCC y estadísticas básicas eventos cada 50kt





**Figura 87. Resumen PCC simulaciones**

De los gráficos anteriores se puede mencionar lo siguiente:

- Para los 5 casos la productividad disminuye a medida que el número de eventos que suceden en la calle aumenta, esto se aprecia claramente en la figura 87. Esto indica que la productividad de la calle está fuertemente ligada al número de eventos de los puntos de extracción.
- A medida que el tonelaje entre eventos aumenta, la producción presenta un aumento ya que el número de interrupciones operacionales en la calle disminuye. Este efecto se aprecia claramente para un determinado número de eventos, puesto que además de producirse interferencias operacionales debido a la reparación de la calle por efecto de los puntos de extracción, la calle completa se detiene cuando el pique falla sin importar cuantos puntos están activos o fallados y al estar más tiempo detenido el menos tiempo efectivo para producir tiene el LHD.
- Existen casos de productividad que no han sido reportados. Lo anterior se explica debido a que la estrategia de cierre de los puntos y de los piques es fija, pudiendo solucionar este problema realizando más replicaciones y simulaciones.

- Al graficar las 5 simulaciones juntar lo que se logra es representar la curva PCC del cruzado de producción para las diversas frecuencias de ocurrencia de eventos que se presentan en los piques la cual viene de la curva U, es decir, pasar de una simulación estacionaria (tonelaje entre eventos fijos en los piques) a una dinámica (variación del tonelaje para que el pique falle según el desplazamiento en la curva U).

Cabe destacar que esta herramienta (simulaciones) es fundamental para situaciones en que la data no se encuentre disponible, por ejemplo, cuando no existan Curvas U o PCC de alguna componente o para ponerse en situaciones futuras o que se deseen implementar en la mina, ya que una buena simulación nos puede dar diversos escenarios con el objetivo de tomar decisiones de acuerdo a lo que se necesita, que no necesariamente es el tener una mayor producción.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones se dividen en diversas áreas, las que se presentan a continuación:

### Información piques de traspaso

- El conocimiento del comportamiento de los piques de traspaso es un área a la que actualmente se le da muy poco énfasis, sin embargo, esta componente del sistema minero es fundamental a la hora de cumplir con las metas de producción propuesta por los planificadores, pudiendo este ser el “cuello de botella” de todo el sistema minero.
- El número de eventos ocurridos durante el año en todos los piques de traspaso es muy variable, teniendo mínimos del orden de los 40 eventos (mayo) y máximos del orden de los 120 eventos (diciembre).
- La mayoría de los eventos sucede en los piques que presentan una menor madurez (HC1 producción entre 0 – 20 Kt/mes). En cambio, para los piques más antiguos (HC2, producción entre 80 – 120 Kt/mes), el número de eventos es estable durante casi todos los períodos (aproximadamente 20 eventos por mes).
- Los eventos de colgaduras son los eventos más comunes y suceden con una mayor frecuencia en los piques. Por otro lado, los que presentan una madurez menor (HC2) el mayor número de eventos asociados son las colgaduras, casi no existiendo en piques asociados al HC1 (más viejos).
- Los eventos mecánicos se mantienen relativamente constantes en el tiempo, para ambos cruzados de transporte.

### Curvas U y PCC

La forma obtenida dista de la “curva de la bañera” asociada a los equipos de confiabilidad mecánicos. Sin embargo, se aprecian dos tendencias claramente marcadas: la primera se puede asociar a fallas tempranas, cuando el pique recién ha comenzado a ser utilizado y el número de fallas es mayor, y la segunda, un período de régimen en que las interferencias operacionales son mínimas (aproximadamente cada 50 Kt).

- La Curva U asociada a eventos mecánicos presenta un comportamiento de una componente mecánica, no notándose claramente la “curva de la bañera”, pero al calcular la regresión a la Curva U del HC2, se aprecia que tiene un comportamiento creciente, o sea, a medida que la componente envejece más eventos se suceden en ésta.
- La máxima productividad del pique de traspaso está condicionada por el número de eventos que ocurrieron en éste, presentando una clara tendencia decreciente en los máximos relacionados a cada evento.
- A medida que aumentan los eventos (más de 10), la producción tiende a estabilizarse en torno a las 40 – 60 Kt/mes.
- Se puede observar una alta variabilidad en los tonelajes, relacionados con un menor número de eventos; ésta se explica no solamente por el número de interferencias operacionales, sino también porque la extracción se planificó de esa manera (efecto plan).

### **Simulación**

- La productividad del cruzado de producción se relaciona de manera inversa con la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia a nivel de puntos de extracción y en piques de traspaso.

- A medida que el tonelaje entre eventos aumenta, la producción presenta un aumento, ya que el número de interrupciones operacionales en la calle disminuye. Este efecto se aprecia claramente para un determinado número de eventos, puesto que, además de producirse interferencias operacionales debido a la reparación de la calle por efecto de los puntos de extracción, la calle completa se detiene cuando el pique falla sin importar cuántos puntos están activos o fallados y al estar más tiempo detenido el menos tiempo efectivo para producir tiene el LHD.
- Se representa la curva PCC del cruzado de transporte para las diversas frecuencias de ocurrencia de eventos que se presentan en los piques, la cual viene de la curva U, es decir, pasar de una simulación estacionaria (tonelaje entre eventos fijos en los piques) a una dinámica (variación del tonelaje para que el pique falle según el desplazamiento en la curva U).

## RECOMENDACIONES

Mantener bases de datos actualizadas es de vital importancia para la planificación y optimización de la mina, siendo PT Freeport DOZ un ejemplo a seguir, ya que a pesar que ésta se encuentra en planillas Excel, la información contenida es completa.

- Realizar el estudio de los piques de traspaso para otras minas, con el objetivo de conocer de mejor manera el comportamiento de éstos, ya que el intervalo de tiempo en que se realizó este estudio, muestra lagunas en la vida de los piques.
- Considerar en la planificación de mediano plazo el impacto en la productividad de las interferencias operacionales y de los piques de traspaso, tomando en cuenta las Curvas U y PCC.
- Las simulaciones, es una herramienta es fundamental para situaciones en que la data no se encuentre disponible, por ejemplo, cuando no existan Curvas U o PCC de alguna componente o para ponerse en situaciones futuras o que se deseen implementar en la mina, ya que una buena simulación nos puede dar diversos escenarios, con el objetivo de tomar decisiones de acuerdo a lo que se necesita, que no necesariamente es el tener una mayor producción

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TRONCOSO, S. *Confiabilidad de programas de producción en sistema mineros subterráneos somplejos*. Tesis (Título de Magíster en Minería). Santiago, Chile : Universidad de Chile, 2009, 154 pp.
2. RIVERO, V. *Evaluación geomecánica de estrategias de socovación en minería subterránea*. Tesis (Título de Ingeniero Civil en Minas). Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2008, 127pp.
3. RUBIO, E. *Diseño de minas subterráneas*. [Slideshare]. *MI 58B*. 2009. [Fecha de consulta: 23 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/hamiltonfloreszavaleta/01-introduccion-de-siseo-de-mina-subterraneas>
4. SALAMANCA, F. *Aplicación de la redundancia activa en la programación de producción de mina subterránea*. Tesis (Título de Ingeniero Civil en Minas). Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2007.
5. CORNEJO, M. 2008. *Impacto en la productividad del nivel de traspaso en la confiabilidad de un programa de producción*. Memoria (Título de Ingeniero Civil en Minas). Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2008, 130 pp.
6. CAÑEDO, L y TIRADO, J. 2019. *Problemas resueltos de probabilidad y estadística*. [en línea]. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Cómputo, 2019 [fecha de consulta: 12 de enero de 2021] Disponible en: [https://www.escom.ipn.mx/docs/oferta/matDidacticoISC2009/PEstdstc/Problemario\\_ProbEstadistica.pdf](https://www.escom.ipn.mx/docs/oferta/matDidacticoISC2009/PEstdstc/Problemario_ProbEstadistica.pdf)
7. CODELCO. *Memoria Anual*. Santiago de Chile : Racic Grupo Diseño / XDiseño, 2014.

8. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. *Anuario Minero*. 2015. Lima : s.n., 2015.
9. BLAS, J. *Evaluación y análisis del nivel de gestión de riesgos basado en la norma internacional Ohsas 18001 en la empresa contratista Opermin S.A.C. - Mina Raúl - Cía minera Condestable*. Tesis (Título de Ingeniero de Minas).Puno : Universidad Nacional del Altiplano, 2018, 178 pp.
10. OSEDA, D.*Metodología de la Investigación*. Lima : Ed. Pirámide, Perú, 2008, Vol. 186.
11. LOPEZ, P. Población muestra y muestreo. Punto Cero [online]. 2004, vol.09, n.08 [citado 2021-02-19], pp. 69-74 . Disponible en: <[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 1815-0276.



## **ANEXOS**

# Anexo 1

**Gráficos:** Perfil geológico en la zona Vinchos Sur de la mina Condestable, proporcionado por CMC.

