



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

CONFIABILIDAD DE PROGRAMAS DE PRODUCCIÓN EN SISTEMAS MINEROS
SUBTERRÁNEOS COMPLEJOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

SEBASTIÁN HORACIO TRONCOSO BÓRQUEZ

PROFESOR GUÍA:
ENRIQUE RUBIO ESQUIVEL

MIEMBROS DE LA COMISION:
JULIÁN ORTIZ CABRERA
RODRIGO PASCUAL JIMENEZ
MAURICIO LARRAÍN

SANTIAGO DE CHILE

2009

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es proponer, desarrollar e implementar un modelo matemático para calcular la confiabilidad de un programa de producción, entendiendo a esta última como la probabilidad de al menos alcanzar el tonelaje planificado en cada periodo del programa. El trabajo realizado se enfoca en la minería subterránea de Block y Panel Caving, con múltiples niveles de infraestructura productiva (niveles de producción, traspaso y transporte).

Se identificó qué partes de la infraestructura minera pueden ser analizadas como componentes individuales con el objeto de parametrizar la confiabilidad de cada una de ellas en función del número esperado de eventos de interferencia y las características productivas propias de dicha entidad, para luego, considerando las relaciones de conectividad dictadas por el diseño minero, modelar un sistema minero de Panel Caving tipo, como una reunión de componentes interconectadas. 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 traspaso, dependiendo de los datos considerados para dicho análisis.

Los resultados de los experimentos realizados en el modelo de confiabilidad propuesto indican que el sistema de manejo de materiales aguas abajo de los puntos de extracción es un subsistema fundamental para conseguir las metas productivas con una probabilidad de cumplimiento dada, debido a que los cuellos de botella en el flujo de mineral al interior del sistema minero se presentan mayoritariamente en los túneles de transporte y los piques de traspaso, no así en los puntos de extracción.

Los resultados obtenidos muestran que la distribución del flujo de mineral al interior del sistema minero es relevante en la probabilidad de cumplimiento de un programa productivo, por lo que se recomienda especificar en éstos no tan sólo cómo se ingresa el mineral al sistema minero a través de los puntos de extracción, sino además por qué componentes debe pasar éste para alcanzar la planta de procesamiento. A su vez, los experimentos numéricos realizados permiten mostrar que el programa de preparaciones de una mina subterránea tiene influencia directa en la probabilidad de cumplimiento de un programa productivo dado.

Considerando lo anterior, el modelo de confiabilidad propuesto permite localizar que componentes son críticas en el cumplimiento de un programa productivo dado y, con lo anterior, ser la base para proponer cambios en el diseño, el programa de preparaciones y el programa de producción de manera de entregar una promesa de valor que incorpore de manera explícita las capacidades productivas reales del sistema minero.

Se recomienda utilizar el indicador de confiabilidad con precaución dado que los resultados obtenidos son fuertemente dependientes de los parámetros del mismo y éstos, al momento de ser estimados de información histórica operacional, hacen que la confiabilidad de los resultados sea dependiente de la calidad de esta información. Por otro lado, dado que el modelo de confiabilidad considera únicamente las capacidades productivas del sistema de manejo de materiales y no otras restricciones inherentes a la minería de hundimiento, se recomienda que los cambios realizados en los programas productivos basados en el modelo de confiabilidad sean reevaluados convenientemente.

Abstract

The objective of this thesis work is to generate a mathematical model to compute the reliability of a production schedule, understanding this concept as the probability to achieve, at least, the planned tonnage in each period of the productive program. The work focuses in underground Block and Panel cave mining, with multiple infrastructure levels (production, transfer and haulage).

It was identified which parts of the mining infrastructure could be analyzed as individual components in order to parameterize the reliability of each component as a function of the expected number of interference events and the productive characteristics of the entity. Then, considering the connectivity relations dictated by mine design, the ore handling system of a generic Panel cave mine complex was modeled as a reunion of interconnected components. The proposed model was calibrated and validated with historical operation data from sectors DOZ-ESZ, PT Freeport Indonesia, captured between years 2000 and 2006.

From different experiments tested in the proposed reliability model, it was found that ore handling system, downstream drawpoints, is a fundamental subsystem to reach the protective goals with a given probability of achievement. It was observed that the main bottleneck in the ore flow through the mining system is principally located at orepasses and haulage tunnels, not at drawpoints, which generally has enough redundancy to achieve the production targets.

Additionally, obtained results shows that ore flow distribution inside the mining system is relevant in the probability of achievement of a productive program, so, it is recommended to specify the productive load of each component of the system, not only drawpoints. Furthermore, the realized experiments shown that development schedule has direct influence in the reliability of a production schedule, since it dictates the additional available infrastructure in each period.

Considering the previous, the proposed reliability model allows locating which components are critical in the achievement of a production schedule and with this, to be the base to propose changes in mine design, development schedule and the production schedule in order to give a value promise that incorporates explicitly the actual productive capacities of a mining system.

It is recommended to utilize the indicator reliability carefully, since the results are strongly dependent on the parameters of the model and these, at the moment they were estimated from historical operational data, made that the reliability of the results to be dependant on the quality of this information. Finally, due to the reliability model considers only the productive capacities of the ore handling system and not other constraints inherent to cave mining, it is recommended that any change based on the reliability model will be reevaluated conveniently.

Agradecimientos

A mis padres, Fernando y Claudia, por todo el sostén que me han dado durante mis estudios, por apoyarme en el camino que estoy recién empezando y ser una verdadera ayuda cuando las decisiones no son fáciles.

A mis hermanos, Diego, Alejandra e Ignacio, por entregarme su alegría y ayuda cada vez que lo necesito, por dejarme ser parte importante de sus vidas y poder formar parte de tan selecto grupo de personas.

A Jessica, gracias por tu tiempo, paciencia y cariño. Tu apoyo ha sido muy importante en mi vida y no tengo dudas que lo seguirá siendo.

A mi profesor guía, Enrique Rubio, por mostrarme lo importante (y lo extenuante) de siempre cuestionarlo todo de manera constructiva. Sin dudas has sido parte más que significativa en mi desarrollo profesional, gracias por entregarme tantas oportunidades.

A los profesores de mi comisión revisora, Julián Ortiz, Rodrigo Pascual y Mauricio Larraín, por ayudarme a que este trabajo sea un mejor trabajo, al mostrarme puntos de vista que sin dudas lo complementan y enriquecen.

A todos mis amigos del Departamento de Ingeniería de Minas, sin dudas los momentos de trabajo intenso fueron menos duros en su compañía, gracias por tantos momentos felices y tantas horas compartidas que hemos disfrutado.

A Felipe y compañía, ahora que empiezo un nuevo rumbo me doy cuenta de lo valioso de cada asado, piscinazo y viajecito que hemos compartido.

A la Cátedra de Tecnología Minera de la Universidad de Chile, por entregarme el espacio y soporte para realizar la investigación presentada en este trabajo.

Índice de contenidos

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	5
	Objetivo General	5
	Objetivos específicos	5
1.2	Metodología	5
1.3	Resultados esperados.....	6
1.4	Alcances.....	6
2	Antecedentes bibliográficos	7
2.1	Sistemas de producción mineros.....	7
	Interferencias operacionales en sistemas mineros	12
2.2	Planificación de la producción	14
2.3	Confiabilidad	17
	Sistemas y componentes	17
	Procesos de conteo de eventos	24
2.4	Confiabilidad de sistemas mecánicos.....	28
	Modelo de potencia.....	29
	Modelo lineal.....	29
	Modelo logarítmico.....	30
2.5	Confiabilidad aplicada a la planificación de producción	30
3	Modelo de confiabilidad multinivel.....	36
3.1	Curvas U	36
3.2	Curva de producción característica (PCC).....	37
3.3	Confiabilidad de una componente minera.....	39
3.4	Confiabilidad del nivel de producción	40
	Subsistema cruzado de producción sin pique de traspaso	40
	Subsistema cruzado de producción con 1 pique de traspaso	42
	Subsistema cruzado de producción con múltiples piques de traspaso	44
	Confiabilidad del nivel de producción como sistema independiente	45
3.5	Confiabilidad del nivel de transporte.....	47
	Subsistema cruzado de transporte.....	47
	Confiabilidad del nivel de transporte como sistema independiente.....	49
3.6	Conexión de niveles de producción y transporte	50
3.7	Resolución del sistema K out of N.....	53

3.8	Consideraciones sobre la estimación del número necesario de componentes en un sistema redundante.....	56
	Por redundancia total del sistema	56
	Por redundancia de componentes.....	57
	Por productividad media.....	58
3.9	Consideraciones sobre el cálculo del tonelaje nominal de componentes.....	59
4	Estudio de caso: Mina DOZ-ESZ, PT Freeport Indonesia	62
4.1	Descripción del sistema minero	63
	Nivel de producción.....	63
	Nivel de transporte	64
4.2	Modelo de confiabilidad.....	65
	Relaciones jerárquicas	65
	Supuestos específicos	66
4.3	Construcción de parámetros de entrada para el modelo de confiabilidad	68
	Curvas U.....	68
	Curvas de producción característica	73
4.4	Validación del modelo de confiabilidad	82
	Puntos de extracción.....	82
	Túneles de producción	86
	Piques de traspaso	90
	Túneles de transporte	94
5	Experimentos sector DOZ-ESZ y análisis de resultados	97
5.1	Programa de producción para alcanzar 80 Ktpd.....	97
5.2	Tonelaje libre de riesgo	100
5.3	Análisis de componentes críticas.....	106
6	Experimentos genéricos y análisis de resultados	117
6.1	Componentes adicionales en la confiabilidad del sistema minero	117
	1 versus 2 piques de traspaso por cruzado de producción.....	118
6.2	Programa de preparaciones	120
	Simulación: retraso en la construcción de un pique.....	123
6.3	Diseño minero asistido por modelo de confiabilidad	124
	Ubicación de piques de traspaso	126
7	Conclusiones y recomendaciones.....	129
7.1	Trabajo futuro	130

8	Bibliografía	131
9	Anexos.....	133
9.1	Anexo A: Implementación VBA del algoritmo de resolución del sistema K out of N para componentes no idénticas.....	133
9.2	Anexo B: Parametrización de parámetros del modelo de confiabilidad.....	133
	Curvas U.....	133
	Curvas de producción característica	135
	Tonelajes nominales	140

Índice de figuras

Figura 1. Incertidumbre en la planificación de producción.....	2
Figura 2. Izquierda: evento de sobretamaño en punto de extracción (Rubio, 2006). Derecha: colgadura en un punto de extracción.	3
Figura 3. Productividad mina en función del número de eventos de colgadura y sobretamaño observados (Rubio, 2006).	4
Figura 4. Vista en planta del nivel de producción Palabora (Calder et al, 2000).....	8
Figura 5. Vista en planta del nivel de producción mina Premier (Bartlett y Croll, 2000).....	8
Figura 6. Izquierda: Conexión entre niveles de producción y transporte mediante piques de traspaso. Derecha: vista en planta del nivel de transporte mina Henderson (Keskimani et Al, 2004).	9
Figura 7. Sistema de manejo de materiales multinivel con ferrocarriles, mina Resolution (Pascoe, Oddie y Edgar, 2008).	10
Figura 8. Esquematización de la conexión entre 2 niveles de producción a diferentes cotas con un único nivel de transporte en III Panel de Andina (Aguayo et Al, 2004).....	11
Figura 9. Esquema general del sistema de manejo de materiales del complejo minero El Teniente.....	11
Figura 10. 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.	12
Figura 11. Conexión de componentes en serie.	18
Figura 12. Conexión de componentes en paralelo.	18
Figura 13. Confiabilidad de sistema en serie y paralelo en función de la confiabilidad de sus componentes.	19
Figura 14. Conexión de componentes en series en paralelo.	20
Figura 15. Conexión de componentes en paralelos en serie.	21
Figura 16. Confiabilidad del sistema de series en paralelo y paralelos en serie en función de la confiabilidad de sus componentes.	22
Figura 17. Confiabilidad del sistema K out of N en función de la confiabilidad de sus componentes para distintos valores de K.	24
Figura 18. Clasificación de procesos de conteo de eventos por calidad de reparación.	25
Figura 19. Descomposición de sistema minero en componentes (Kazakidis y Scoble, 2002).....	30

Figura 20. Izquierda: curva tipo para modelar la función de intensidad (Kazakidis y Scoble, 2002). Derecha: Modelos considerados para representar curva bathtub en diferentes etapas (Kazakidis y Scoble, 2002).	31
Figura 21. Curva de intensidad de falla para puntos de extracción (Rubio, 2006).	32
Figura 22. Diagrama de conexión en bloques para el cálculo de confiabilidad de un programa de producción (Rubio, 2006).	33
Figura 23. Diagrama de conexión en bloques para el calculo de confiabilidad de un programa de producción en un sistema minero multinivel (Salamanca, 2007).	34
Figura 24. Relación entre productividad y eventos de interferencia en un cruzado de producción.	37
Figura 25. Curva de producción característica de un cruzado de producción.....	38
Figura 26. Diagrama esquemático de cálculo de confiabilidad de una componente minera.	40
Figura 27. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción.....	40
Figura 28. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con pique de traspaso.....	43
Figura 29. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con múltiples piques de traspaso.....	44
Figura 30. Esquema de conectividad de componentes de un nivel de producción como sistema independiente.	46
Figura 31. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de transporte.....	47
Figura 32. Esquema de coenctividad de componentes en un nivel de transporte como sistema independiente.	49
Figura 33. Esquema de conectividad de componentes en un sistema minero multinivel..	51
Figura 34. Esquema de conexión entre nivel de producción y acarreo.	52
Figura 35. Interpolación lineal para la resolución del sistema K out of N.....	55
Figura 36. Confiabilidad en función del número necesario de componentes (K) con y sin interpolación.....	55
Figura 37. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con pique de traspaso.....	60
Figura 38. Izquierda: ubicación de la mina en estudio. Derecha: disposición general de los sectores productivos en el complejo minero Grasberg (Casten et Al, 2008).....	62
Figura 39. Programa de producción del complejo minero Grasberg 2008-2045 (Casten et Al, 2008).	63

Figura 40. Nivel de producción DOZ-ESZ.....	63
Figura 41. Cruzados de transporte considerados en el nivel de transporte.....	64
Figura 42. Diagrama de bloques de conexión de componentes para el cálculo de confiabilidad del programa de producción.....	65
Figura 43. Nivel de producción en detalle para los paneles 25, 26 y 27.....	67
Figura 44. Nivel de producción en detalle para los piques de traspaso LPN1, LPN2 y LPN3.....	67
Figura 45. Curva U de puntos de extracción actual (2000-2006).	69
Figura 46. Fragmento de base de datos original de estado de piques de traspaso.....	70
Figura 47. Curva U de piques de traspasos actual (2006).	72
Figura 48. Curva de producción característica de puntos de extracción actual (2000-2006), todos los registros.....	74
Figura 49. Curva de producción característica de puntos de extracción actual (2000-2006), registros sobre el percentil 80%.	75
Figura 50. Izquierda: Histograma de valores de productividad de puntos de extracción para 0 eventos por mes, todos los registros. Derecha: registros sobre el percentil 80%.....	75
Figura 51. Curva de producción característica de cruzados de producción actual (2000-2006), todos los registros.....	76
Figura 52. Curva de producción característica de cruzados de producción actual (2000-2006), registros sobre el percentil 80%.	77
Figura 53. Izquierda: Histograma de valores de productividad de cruzados de producción para 0 eventos por mes, todos los registros. Derecha: registros sobre el percentil 90%.....	77
Figura 54. Curva de producción característica de piques de traspaso actual (2006), todos los registros.....	78
Figura 55. Curva de producción característica de piques de traspaso actual (2006), registros sobre el percentil 40%.	79
Figura 56. Curva de producción característica de cruzados de transporte actual modificada, todos los registros.....	80
Figura 57. Curva de producción característica considerada para los túneles de transporte.....	81
Figura 58. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de puntos de extracción.....	82

Figura 59. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para puntos de extracción (todos los registros).....	83
Figura 60. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de puntos de extracción (registros sobre el percentil 80% de la distribución para cada número de eventos).	84
Figura 61. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para puntos de extracción (Registros sobre percentil 80%).	85
Figura 62. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en puntos de extracción.	85
Figura 63. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de túneles de producción.	86
Figura 64. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de producción (todos los registros).	87
Figura 65. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de túneles de producción (registros sobre el percentil 90% de la distribución para cada número de eventos).	88
Figura 66. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de producción (registros sobre percentil 90%).	88
Figura 67. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en túneles de producción.	89
Figura 68. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de piques de traspaso.....	90
Figura 69. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para piques de traspaso (todos los registros).	91
Figura 70. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de piques de traspaso (registros sobre el percentil 40% de la distribución para cada número de eventos).	92
Figura 71. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para piques de traspaso (registros sobre percentil 40%).	93
Figura 72. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en piques de traspaso.....	94
Figura 73. Distribución acumulada inversa de los registros productivos históricos de túnel de transporte (8 piques de traspaso).....	95

Figura 74. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de transporte (8 piques de traspaso).....	95
Figura 75. Programa de producción del periodo 2008.....	97
Figura 76. Confiabilidad de puntos de extracción programa de producción 2008.....	99
Figura 77. Confiabilidad versus tonelaje planificado para un punto de extracción y diferentes frecuencias de eventos.....	100
Figura 78. Tonelaje versus frecuencia de eventos para confiabilidad constante en puntos de extracción.....	101
Figura 79. Confiabilidad versus proporción del tonelaje planificado actual (2008).....	102
Figura 80. Evolución del tonelaje en el tiempo para valores fijos de confiabilidad (distribución de flujo proporcional al programa de producción).....	102
Figura 81. Evolución del tonelaje en el tiempo para valores fijos de confiabilidad (distribución de flujo equitativa entre componentes relacionadas).....	104
Figura 82. Confiabilidad del programa de producción 2008 sin utilizar el LP06S.	105
Figura 83. Confiabilidad programa de producción DOZ-ESZ periodo 2008.....	106
Figura 84. Confiabilidad por cruzados de transporte, periodo 2008.	107
Figura 85. Composición de la confiabilidad del cruzado de transporte HC2, periodo 2008.	108
Figura 86. Distribución de productividad de un cruzado de transporte con 15 piques activos.....	109
Figura 87. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC-OP de los piques de traspaso asociados al cruzado de transporte HC2, octubre 2008.....	109
Figura 88. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC de paneles con confiabilidad reducida y tonelaje planificado reducido (caso 3), octubre 2008.....	111
Figura 89. Confiabilidad de puntos de extracción del Panel 12, octubre 2008.	112
Figura 90. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC de paneles con confiabilidad elevada y tonelaje planificado elevado (caso 4), octubre 2008.	113
Figura 91. Confiabilidad versus tonelaje planificado para un cruzado de producción con 1 y 2 piques de traspaso.	119
Figura 92. Diagrama de relaciones de conectividad. 2 cruzados de producción, cada uno con 1 pique de traspaso y 20 puntos de extracción.....	121
Figura 93. Confiabilidad versus tonelaje planificado por periodos para los programas de preparaciones 1 y 2.....	122
Figura 94. Simulación: retraso en la construcción del pique LP04S.....	123

Figura 95. Productividad del cruzado en función de la infraestructura disponible.....	125
Figura 96. Nivel de producción sectores DOZ/ESZ.....	127
Figura 97. Ubicación de piques de traspaso en el cruzado de producción.	128
Figura 98. Curva U de puntos de extracción.	134
Figura 99. Curva U de piques de traspaso.....	135
Figura 100. Curva de producción característica considerada para los puntos de extracción.	135
Figura 101. Curva de producción característica considerada para los túneles de producción.	137
Figura 102. Curva de producción característica considerada para los piques de traspaso.	138
Figura 103. Curva de producción característica considerada para los túneles de transporte.....	139
Figura 104. Curva PRC de puntos de extracción.	140

Índice de tablas

Tabla 1. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de infraestructura minera subterránea y técnicas de reparación (Le Faux, 199?).	13
Tabla 2. Total de componentes consideradas en el modelo de confiabilidad.	66
Tabla 3. Izquierda: fragmento de la base de datos de estados históricos de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.....	68
Tabla 4. Izquierda: fragmento de la base de datos de extracción histórica de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.....	69
Tabla 5. Izquierda: fragmento de la base de datos de estados históricos de piques de traspaso. Derecha: estadísticas básicas.	71
Tabla 6. Izquierda: fragmento de la base de datos de extracción histórica de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.....	72
Tabla 7. Validación del modelo de confiabilidad.....	96
Tabla 8. Confiabilidad mensual programa de producción 2008.....	98
Tabla 9. Número total de componentes disponibles por periodo según programa de producción 2008.....	103
Tabla 10. Detalle del tonelaje en redundancia de los paneles 01, 02 y 10.	114
Tabla 11. Estadísticas básicas de los registros de confiabilidad de los puntos de extracción de los paneles 01, 02 y 10.	114
Tabla 12. Programas de preparaciones 1 y 2.	121
Tabla 13. Parametrización de la curva U de puntos de extracción.	134
Tabla 14. Parametrización de la curva U de puntos de extracción (continuación).....	134
Tabla 15. Parametrización de curva U de piques de traspaso.	135
Tabla 16. Parametrización de la curva PRC de puntos de extracción.	140
Tabla 17. Tonelajes nominales considerados para diferentes componentes.....	140

1 Introducción

La planificación minera es la actividad que define qué, cuándo y cómo se extraerán los recursos presentes en un yacimiento mineral. Su importancia es vital para el desarrollo de la actividad, debido a que permite enlazar los objetivos estratégicos de una compañía minera dada con el recurso mineral. Una de las principales tareas de la planificación es generar el programa de producción, que define los tonelajes y las leyes respectivas a ser extraídas durante la vida de la mina, lo que se traduce finalmente en una cuantificación del potencial económico de un yacimiento dado en el tiempo. Es por esto, que en el proceso de planificación se está apostando no tan solo por un determinado comportamiento productivo a nivel mina, si no además se compromete el porvenir económico de la faena completa, tanto en sus labores de extracción como de beneficio.

Dado lo anterior, el logro de las metas productivas propuestas en un programa de producción es fundamental para lograr los objetivos económicos y operacionales definidos en la concepción del negocio, sin embargo, la comparación entre el resultado operacional y el programa de producción que lo generó puede realizarse de variadas formas, por ejemplo:

- Cumplimiento del tonelaje de mineral producido.
- Cumplimiento de los volúmenes extraídos comprometidos.
- Cumplimiento de los finos de metal producidos.
- Cumplimiento de los costos de producción.
- Otros.
- Todos los anteriores juntos.

Por otro lado, la ejecución de un determinado programa de producción está condicionada por la incertidumbre proveniente de diversas fuentes, entre las que pueden mencionarse:

- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de infraestructura productiva (túneles, piques de traspaso, puntos de extracción, etc.).
- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de recursos productivos (equipos de producción, de apoyo, insumos en general, etc.).

- Incertidumbre asociada a la disponibilidad de recursos minerales (leyes, litologías, mineralización, calidad metalúrgica, etc.).
- Incertidumbre en el comportamiento de los mercados (precios de metales, insumos en general, mando de obra, etc.).
- Incertidumbre asociada al entorno legal y medioambiental (royalties, impuestos, límites de concentración de contaminantes, etc.)

Debido a la naturaleza determinista de un programa productivo, cuando las condiciones operacionales varían de las consideradas en la generación del plan, por cualquiera de las fuentes de incertidumbre mencionadas anteriormente, la consecución de las metas productivas es incierta.

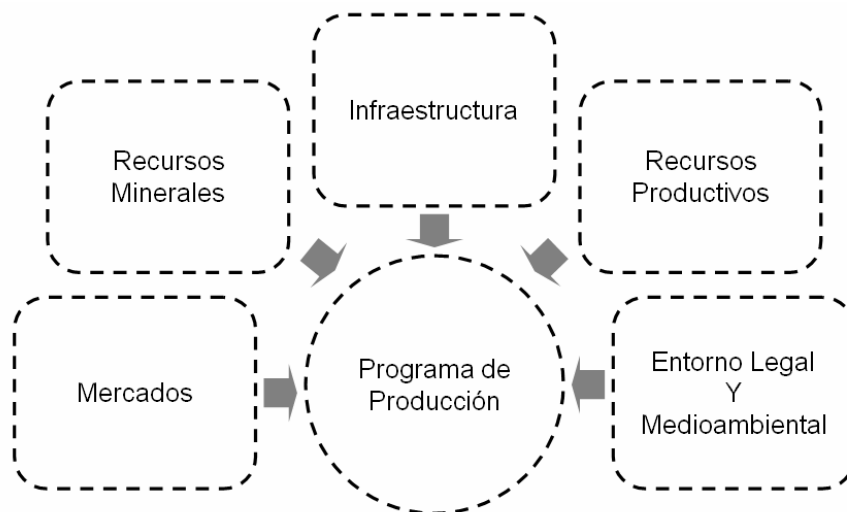


Figura 1. Incertidumbre en la planificación de producción.

Particularmente, en lo referente a la disponibilidad de infraestructura en la explotación minera subterránea mediante Block o Panel Caving se observan constantemente eventos de interrupción que detienen el flujo de mineral por algunas o todas las componentes de la infraestructura productiva del sistema minero, que afectan en el libre flujo de mineral a través de éstas y que normalmente no se consideran explícitamente en la construcción de un programa de producción. A modo de ejemplo, en la siguiente figura se muestra un evento de sobretamaño en un punto de extracción; el tamaño del material hace imposible su carguío y por tanto debe ser fragmentado por técnicas de reducción secundaria, con el

objeto de que dicho punto de extracción esté disponible nuevamente para el carguío de material.



Figura 2. Izquierda: evento de sobretamaño en punto de extracción (Rubio, 2006). Derecha: colgadura en un punto de extracción.

Sin importar la naturaleza de estas interrupciones, su ocurrencia se comporta de forma aleatoria, e impacta en mayor o menor grado en la productividad del sistema minero, como se observa en la siguiente figura, donde se pone en evidencia que a medida que el número de eventos de colgadura y sobretamaño a nivel de puntos de extracción aumenta, la productividad del sistema decrece:

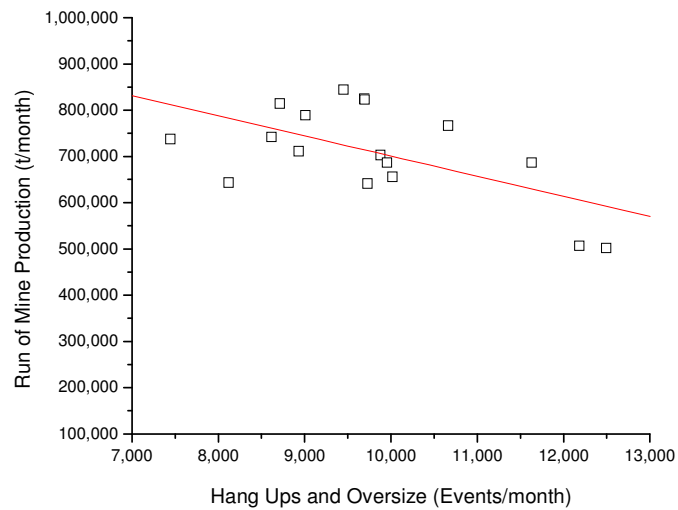


Figura 3. Productividad mina en función del número de eventos de colgadura y sobretamaño observados (Rubio, 2006).

Estos eventos de interferencia son intrínsecos al comportamiento productivo del sistema minero y debido a que afectan su productividad, deben ser considerados explícitamente en el proceso de planificación. Por otro lado, se reconoce que la arquitectura productiva de cualquier labor subterránea de Block o Panel Caving es siempre compleja: existen un gran número de túneles, puntos de extracción, piques de traspaso, niveles de transporte, etc., cada uno con sus propios eventos de interrupción y capacidades asociadas, conectados de variadas formas y posibilidades, existen dependencias y redundancias que impactan en la probabilidad de cumplimiento de un programa productivo. Es por lo anterior que el presente trabajo pretende generar un modelo de confiabilidad en base a la infraestructura minera que permita calcular la probabilidad de cumplimiento de un programa de producción dado, considerando explícitamente la ocurrencia de eventos de interferencia operacional en diferentes componentes productivas, de modo de entregar al proceso de planificación una herramienta que permita evaluar promesas de valor de manera más realista y confiable.

1.1 Objetivos

Objetivo General

Generar un modelo matemático para el cálculo de la confiabilidad de un plan de producción de un sistema minero subterráneo complejo.

Objetivos específicos

- Identificar eventos de interferencia para diferentes componentes de infraestructura minera subterránea.
- Proponer un modelo que relacione la ocurrencia de eventos de interferencia y las características productivas de diferentes tipos de componentes.
- Construir una metodología estándar para el cálculo de confiabilidad de diferentes tipos de componentes de infraestructura minera.
- Generar una metodología de conexión de componentes entre niveles de producción y transporte.
- Estimar la validez del modelo de confiabilidad propuesto.
- Analizar el impacto de la disponibilidad de infraestructura productiva en el cumplimiento de un programa de producción.

1.2 Metodología

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

- d. Validación del modelo.
- e. Confiabilidad del programa de producción para alcanzar 80Ktpd (2008).
7. Análisis de resultados.
8. Conclusiones y recomendaciones.

1.3 Resultados esperados

Se espera que a través del cálculo de la probabilidad de cumplimiento de un programa de producción dado en base a la disponibilidad de infraestructura por la incorporación de eventos de interferencia, el modelo de confiabilidad entregue al planificador la capacidad de identificar cuellos de botella en el flujo de mineral a través de las diferentes componentes de un sistema minero subterráneo de block o panel caving. Con lo anterior se espera que el modelo propuesto permita comprender de mejor forma como se relacionan el programa de producción, el programa de preparaciones mineras y el diseño minero subterráneo.

1.4 Alcances

Los alcances del presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- Minería de hundimiento por block o panel caving.
- Sistemas mineros con niveles de producción y transporte, conectados por piques de traspaso (no se consideran nivel de hundimiento ni infraestructura de ventilación).
- Modelo de confiabilidad en base a la disponibilidad de infraestructura productiva.
- Sistema minero en análisis corresponde a los sectores DOZ-ESZ del complejo minero Grasberg, PT Freeport, Indonesia.

2 Antecedentes bibliográficos

2.1 Sistemas de producción mineros

Según Laubscher (1994) 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. La definición anterior no es enfática en el hecho que en una operación minera subterránea el mineral debe transportarse 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. Lo anterior requiere la incorporación de infraestructura productiva adicional a los puntos de extracción identificados por Laubscher, que puede estar presente en diferentes niveles productivos y distribuidos espacialmente de las más variadas formas, para hacer eficiente el proceso de transporte. Este hecho se traduce en que una fracción del yacimiento puede considerarse como “extraída” sólo cuando llega a la planta de procesamiento, o sea, ha pasado a través de todas o algunas de las componentes de infraestructura que el sistema minero posee para ser eficaz en su funcionamiento.

Uno de los sistemas más simples, desde el punto de vista de su infraestructura productiva, es la mina Palabora, en Sudáfrica, cuyo método de explotación es Block Caving. Como explican Calder et al (2000), 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 vaciaran 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:

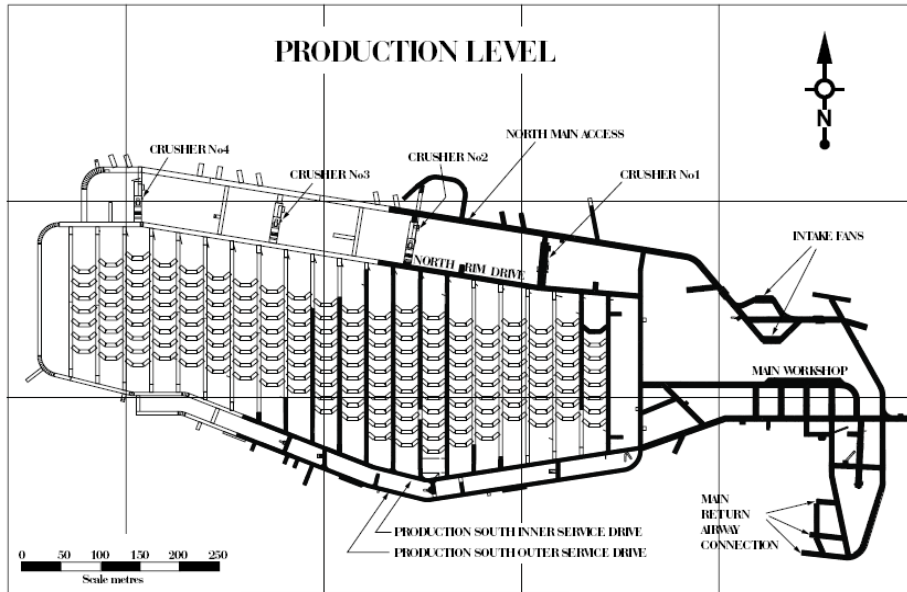


Figura 4. Vista en planta del nivel de producción Palabora (Calder et al, 2000).

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 (Bartlett y Croll, 2000):

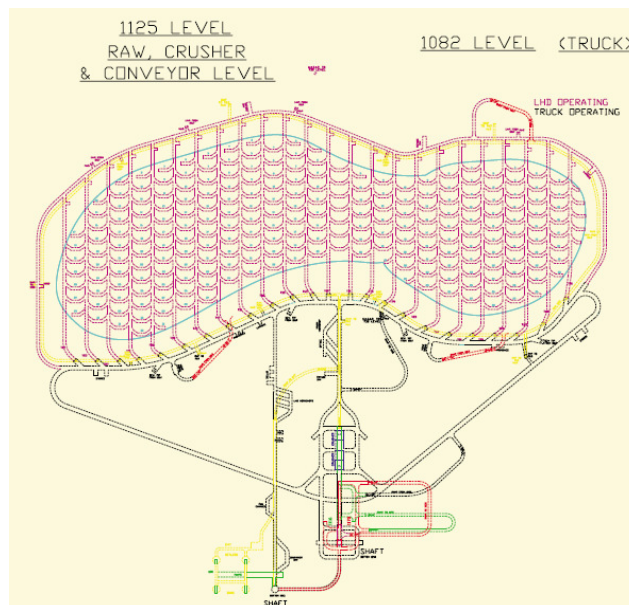


Figura 5. Vista en planta del nivel de producción mina Premier (Bartlett y Croll, 2000).

A diferencia de Palabora, puede observarse que el nivel de producción está diseñado para la operación en conjunto de 2 tipos de equipos: LHD y camiones. Éstos 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 7210m de la mina Henderson (Keskimani et al, 2004) contempla un nivel de transporte ubicado 55m por debajo del nivel de producción y conectado a éste por piques de traspaso, como lo muestra la siguiente figura:

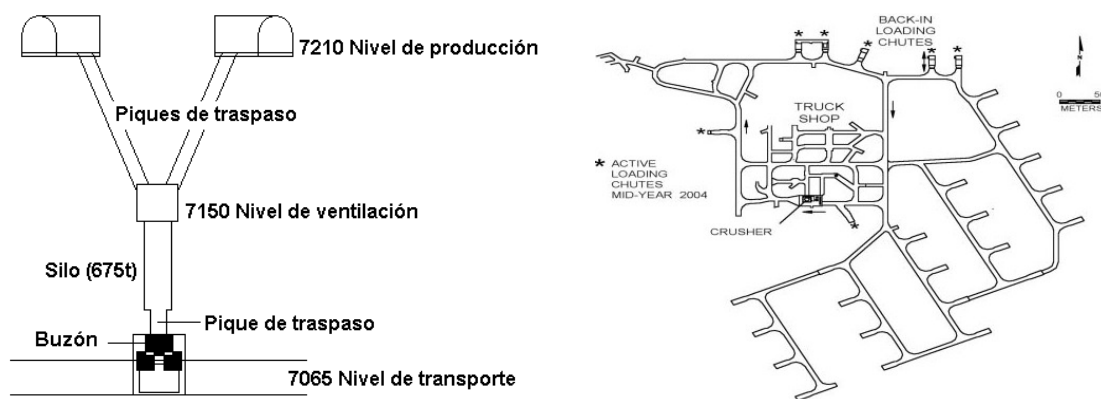


Figura 6. Izquierda: Conexión entre niveles de producción y transporte mediante piques de traspaso. Derecha: vista en planta del nivel de transporte mina Henderson (Keskimani et Al, 2004).

El material 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 675t 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, donde 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 Resolution, en Estados Unidos, donde el nivel de transporte considera la utilización de ferrocarriles.

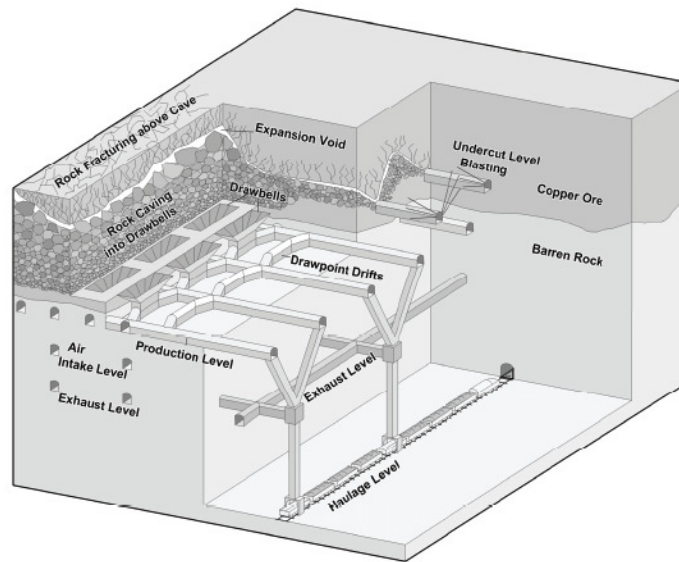


Figura 7. Sistema de manejo de materiales multinivel con ferrocarriles, mina Resolution (Pascoe, Oddie y Edgar, 2008).

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:

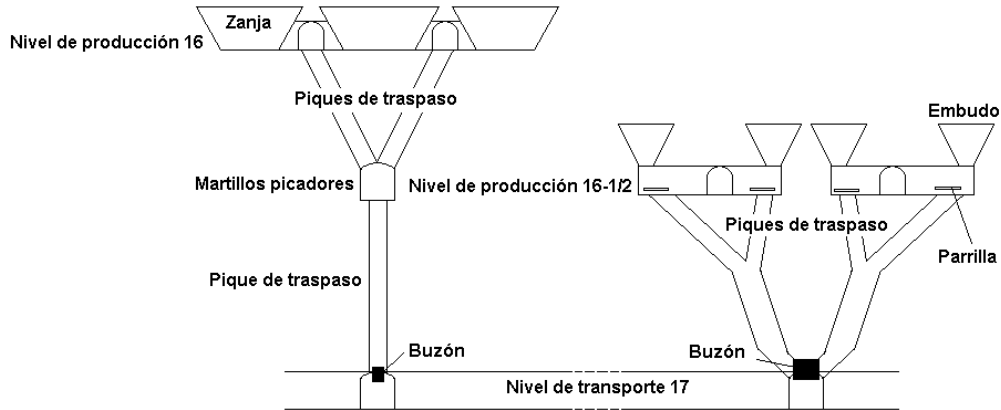


Figura 8. Esquematación de la conexión entre 2 niveles de producción a diferentes cotas con un único nivel de transporte en III Panel de Andina (Aguayo et Al, 2004).

Sin embargo, dependiendo de la geometría del yacimiento, muchas veces la solución anterior no es aplicable, 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:

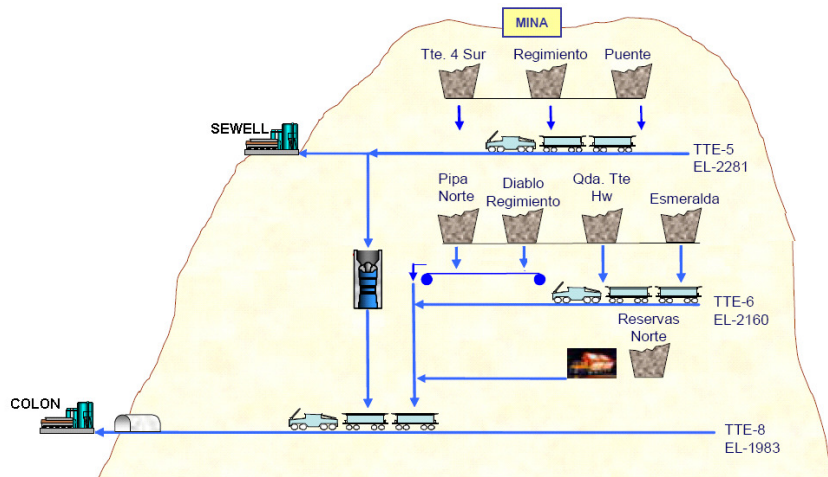


Figura 9. Esquema general del sistema de manejo de materiales del complejo minero El Teniente.

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:

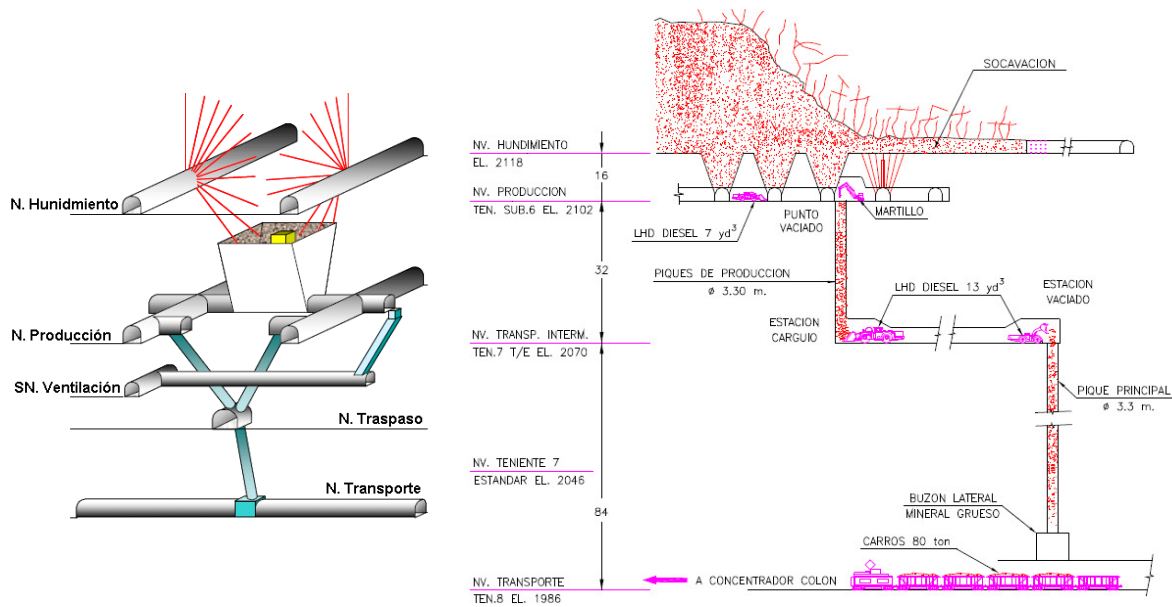


Figura 10. Izquierda: conexión entre niveles de producción y transporte (TTE-5) sector Regimiento. Derecha: Conexión entre niveles de producción y transporte (TTE-8) sector Pilar norte.

Naturalmente, las capacidades productivas de cada uno de los sistemas revisados anteriormente es diferente, 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.

Interferencias operacionales en sistemas mineros

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 y Panel Caving:

Componente	Interferencia	Solución
Puntos de extracción	Sobretamaño	Perforación y tronadura
		Detonación de cargas superficiales
		Martillos rompedores
	Colgadas	Perforación y tronadura (dificultad de acceso para colgadas de mucha altura)
	Compactación de finos	Tronadura secundaria
Cruzados de producción	Cierre para reparación de puntos de extracción	Reparación de puntos de extracción
	Daño en carpeta de rodado	Re pavimentación
	Colapsos	Re excavación
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
		Reparación in-situ
	Daño en carpeta de rodado	Re pavimentación
	Cierre para reparación de buzones	Reparación de buzones

Tabla 1. Eventos de interferencia más frecuentes para diferentes componentes de infraestructura minera subterránea y técnicas de reparación (Le Faux, 199?).

En general, los eventos de interferencia que afectan a componentes de infraestructura minera tienen la particularidad de ser reparables, sin embargo la no disponibilidad temporal de la infraestructura afecta de igual manera en la productividad del sistema minero, siendo la magnitud de este impacto dependiente de las estrategias de reparación y los recursos disponibles para solventarlas (Troncoso, 2006).

2.2 Planificación de la producción

La planificación minera puede definirse como el proceso de ingeniería de minas mediante el cual el recurso mineral se transforma en el mejor negocio productivo para el dueño (Rubio, 2006). Así, la planificación minera tenderá a maximizar la renta del negocio minero activando cada una de sus fuentes, integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno. Dependiendo el contexto, la planificación minera puede clasificarse en:

- Planificación estratégica: tiene que ver con aquellos factores que determinan el valor del recurso minero y cómo estos se relacionan con el mercado respectivo.
- Planificación conceptual: es el proceso que delinea los recursos minerales y físicos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la planificación estratégica y generalmente se enmarca dentro de un ámbito de proyecto. En esta etapa es donde se definen la capacidad y vida de la mina, además de las reservas.
- Planificación operativa: una vez que la mina es puesta en operación, se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero definido en la planificación conceptual. En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos y generar los proyectos que permitan alinearse con el plan minero. El aporte de la planificación operativa es fundamental desde el punto de vista de la definición de indicadores operacionales y retro análisis de planificación.

Por su parte, los horizontes temporales en la planificación se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero, de esta manera pueden definirse:

- Planificación de largo plazo: define la envolvente económica, el método de explotación, ritmos de extracción, secuencias de explotación y las leyes de corte.
- Planificación de mediano plazo: se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo. Produce planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas.

- Planificación de corto plazo: su rol más importante es la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar al largo plazo. Por otro lado, se preocupa de definir indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

Una de las principales tareas del proceso de planificación minera es la definición del determinado programa de producción, que cuantifica las tasas de producción del sistema minero en el tiempo. Esta labor debe realizarse desde los estudios de factibilidad hasta la última fase productiva (Russel, 1987) y sustenta el valor económico de un proyecto minero, definiendo qué parte del yacimiento subyacente corresponde a reservas mineras. La construcción de un programa de producción en una mina de Block o Panel Caving se basa en los siguientes parámetros (Rubio et Al, 2001):

- Tasa de incorporación de área: define para cada periodo del programa la cantidad máxima de puntos de extracción que pueden construirse. Esta restricción se basa generalmente en la geometría del nivel de producción, el comportamiento geotécnico del macizo rocoso y la infraestructura minera disponible.
- Secuencia de construcción de puntos de extracción: define el orden en que los puntos de extracción se construyen. Esta secuencia se define en función de la secuencia de hundimiento.
- Área en producción máxima: en cada periodo del programa, el área activa máxima es función de la infraestructura y los equipos disponibles, como también de la capacidad de ventilación de la mina.
- Velocidad de extracción: limita el tonelaje que puede extraerse desde un punto de extracción en cada periodo del programa. La velocidad de extracción es función de la fragmentación y la velocidad de propagación del hundimiento.
- Razón de tiraje: define una relación temporal entre el tonelaje de un punto de extracción y sus vecinos. Se cree que este parámetro puede controlar la entrada de dilución y el daño en el nivel de producción debido a esfuerzos inducidos.
- Producción objetivo.

Los métodos de hundimiento por bloques y paneles se basan en el proceso natural de fragmentación de un macizo rocoso por la socavación de su base y el flujo del material por efecto de la gravedad. Por lo tanto, se requiere un entendimiento más profundo del

comportamiento geotécnico del macizo rocoso que en otros métodos de explotación donde la granulometría del mineral es resultado de perforación y tronadura convencionales. Los principales parámetros geotécnicos que afectan el proceso de planificación de una mina de hundimiento son los siguientes (Brown, 2003):

- Hundibilidad.
- Iniciación del hundimiento.
- Propagación del hundimiento.
- Fragmentación.
- Comportamiento de los esfuerzos alrededor de los límites del hundimiento.

Los parámetros geotécnicos presentados anteriormente afectan en la definición de algunos de los parámetros requeridos para el proceso de programación de producción como la secuencia de hundimiento, las velocidades de extracción y las tasas de desarrollo. La capacidad de representar la variabilidad de los parámetros que afectan el proceso de programación de producción se traducirá en la disminución del riesgo y en el aumento de la capacidad de predecir el comportamiento productivo de un sistema minero (Summers, 2000).

2.3 Confiabilidad

En su más amplio espectro la confiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un sistema realice la función requerida bajo condiciones establecidas, por un periodo de tiempo establecido (Lakner y Anderson, 1985). La definición anterior involucra intrínsecamente que el sistema está sujeto a la ocurrencia de eventos que interfieren su funcionamiento, genéricamente denominados fallas.

Sistemas y componentes

En general, para el análisis de confiabilidad, los sistemas pueden clasificarse como reparables y no reparables (Rigdon y Basu, 2000):

- **Reparables:** son aquellos sistemas en que cuando una falla ocurre pueden ser devueltos a su estado operativo por algún proceso de reparación diferente al reemplazo del sistema completo.
- **Sistemas no reparables:** son aquellos sistemas en que cuando una falla ocurre no pueden repararse, por lo que deben descartarse y ser reemplazados por otro.

Sin importar de qué tipo de sistema se trate, muchas veces los sistemas analizados son tan complejos y la naturaleza de sus fallas tan diversa, que es necesario dividirlos en subsistemas menores para su análisis. Cada subsistema puede ser considerado a su vez como un sistema, y como tal, ser dividido nuevamente en subsistemas menos complejos. Esta subdivisión puede ser tan fina como se necesite hasta llegar a una componente, que puede definirse como aquella parte de un sistema que es indivisible, o ha llegado a un grado de discretización adecuado para el análisis requerido. Desde otro punto de vista, puede decirse que un sistema es una reunión de diversas componentes, cada una de ellas caracterizable por una confiabilidad propia en un intervalo temporal dado.

La disgregación de un sistema en componentes tiene asociada una relación intrínseca entre ellas que permite reagruparlas, considerando sus respectivas confiabilidades. Para el cómputo de la confiabilidad del sistema en función de sus componentes existen diferentes modelos de conexión entre éstas (Rausand y Hoyland, 2004), dichos modelos se presentan en los siguientes subtítulos.

Conexión en serie

Una conexión en serie entre componentes corresponde a la mostrada en la siguiente figura:

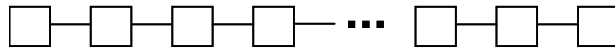


Figura 11. Conexión de componentes en serie.

Conocida la confiabilidad R_i de cada una de las componentes, la confiabilidad del sistema en serie queda determinada por:

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

Cuando las componentes del sistema están conectadas en serie, el sistema falla si al menos una componente falla.

Conexión en paralelo

Una conexión en paralelo entre componentes corresponde a la mostrada en la siguiente figura:

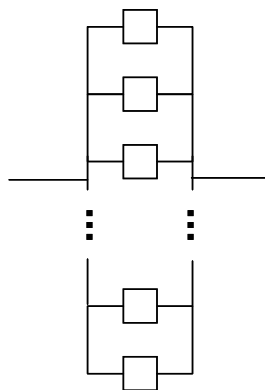


Figura 12. Conexión de componentes en paralelo.

Conocida la confiabilidad R_i de cada una de las componentes, la confiabilidad del sistema en paralelo queda determinada por:

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

Cuando las componentes del sistema están conectadas en paralelo, el sistema falla cuando todas las componentes fallan al mismo tiempo. El siguiente gráfico muestra como se comparan las confiabilidades de sistemas compuestos de tres componentes idénticas, conectadas en serie y en paralelo:

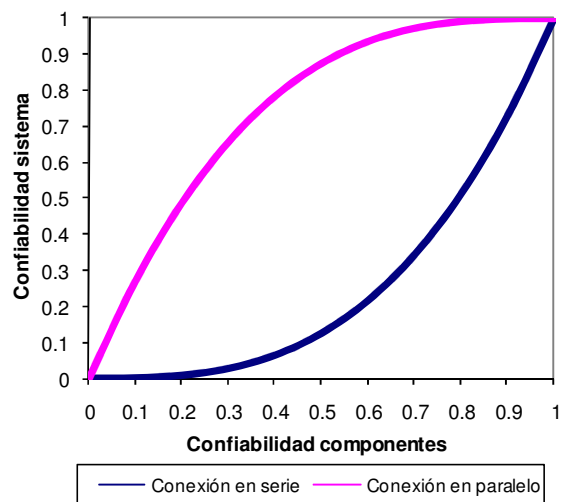


Figura 13. Confiabilidad de sistema en serie y paralelo en función de la confiabilidad de sus componentes.

Conexión de series en paralelo

Una conexión de series en paralelo corresponde a la mostrada en la siguiente figura:

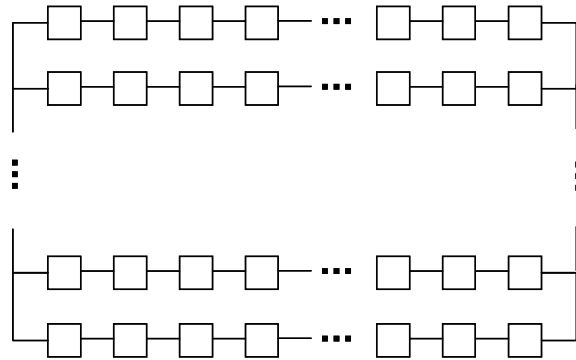


Figura 14. Conexión de componentes en series en paralelo.

Conocida la confiabilidad R_i de cada una de las componentes, la confiabilidad del sistema de series en paralelo queda determinada por:

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

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 una componente de cada serie.

Conexión de paralelos en serie

Una conexión de paralelos en serie corresponde a la mostrada en la siguiente figura:

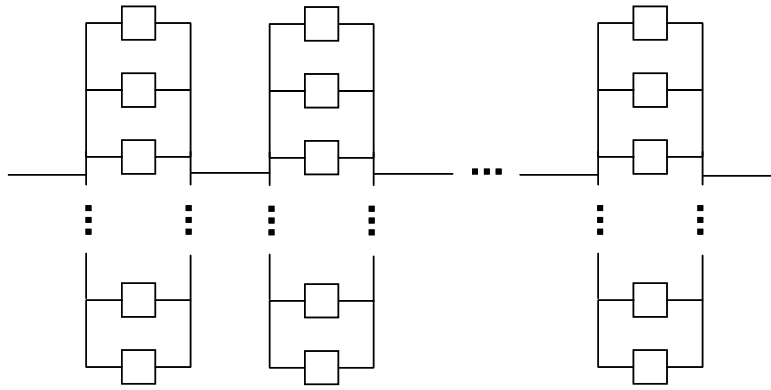


Figura 15. Conexión de componentes en paralelos en serie.

Conocida la confiabilidad R_i de cada una de las componentes, la confiabilidad del sistema de paralelos en serie queda determinada por:

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

Este sistema está compuesto por subsistemas en paralelo y cada uno de estos subsistemas está en serie. Para que falle todo el sistema se necesita que al menos cada componente de un subsistema en paralelo falle. A modo de ejemplo, el siguiente gráfico muestra la diferencia entre conectar un set de componentes en series en paralelo y paralelos en serie:

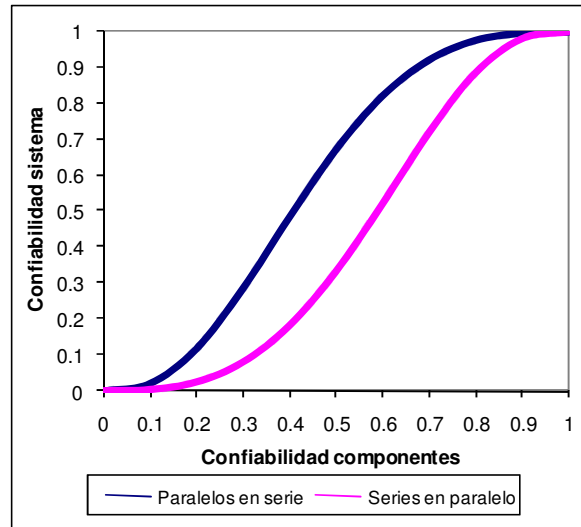


Figura 16. Confiabilidad del sistema de series en paralelo y paralelos en serie en función de la confiabilidad de sus componentes.

En la gráfica anterior, el sistema de paralelos en serie está conformado por la conexión en serie de tres sistemas en paralelo, cada uno de ellos conformado por tres componentes idénticas. Por su parte, el sistema de series en paralelo está conformado por la conexión en paralelo de tres sistemas en serie, cada uno de ellos conformado por tres componentes idénticas.

Conexión redundante K out of N

La conexión K out of N permite representar un sistema que contiene N componentes independientes de los cuales K ($K \leq N$) son indispensables para que el sistema funcione (Boland y Proschan, 1983). La diferencia entre N y K se conoce como redundancia.

El sistema redundante más simple es aquél en que sus componentes (desde el punto de vista de su confiabilidad) son idénticas, en este caso, la confiabilidad del sistema completo puede calcularse mediante:

$$R^{SIST} = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} \cdot R_i^i \cdot (1 - R_i)^{N-i}$$

En un caso más general, cuando el sistema está conformado por componentes cuyos valores de confiabilidad son diferentes, la confiabilidad del sistema puede calcularse mediante:

$$R^{SIST} = \sum_{i=K}^N R_e(i, N)$$

En la expresión anterior, el término $R_e(i, N)$ corresponde a la probabilidad de que exactamente i de N componentes estén en funcionamiento. El valor de este término puede calcularse mediante la siguiente relación recursiva (Kuo y Zuo, 2002):

$$R_e(i, j) = (1 - R_j) \cdot R_e(i, j-1) + R_j \cdot R_e(i-1, j-1) \quad 0 \leq i \leq N \quad 0 \leq j \leq N$$

Considerando las siguientes condiciones de borde:

$$R_e(-1, j) = R_e(j+1, j) = 0 \quad \text{para } j = 0, 1, 2, \dots$$

$$R_e(0, 0) = 1$$

A modo de ejemplo, el siguiente gráfico muestra la diferencia entre conectar un set de 10 componentes en K out of N , variando el número de componentes necesarias:

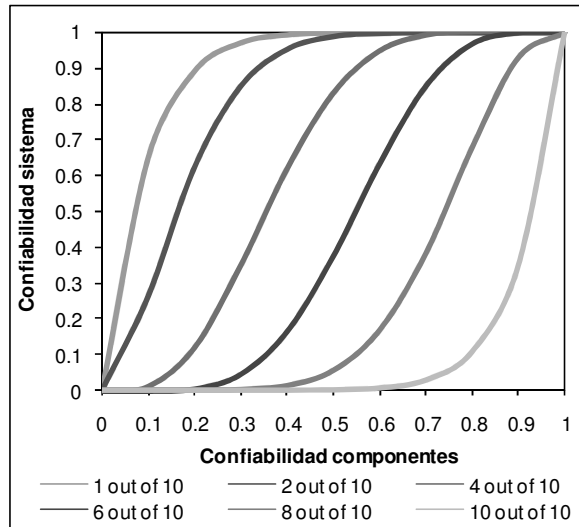


Figura 17. Confiabilidad del sistema K out of N en función de la confiabilidad de sus componentes para distintos valores de K.

Procesos de conteo de eventos

En un sistema reparable, la ocurrencia de eventos en el tiempo (o cualquier medida de envejecimiento adecuada) puede analizarse mediante procesos de conteo, que de manera general pueden describirse como modelos para analizar la ocurrencia de eventos en el tiempo (Rausand y Hoyland, 2004). Una variable de interés al momento de analizar la ocurrencia de eventos en el tiempo es el tiempo entre eventos, definido como el intervalo temporal entre 2 eventos consecutivos, por su parte el número de fallas ocurrido desde que el sistema fue puesto en funcionamiento se denota generalmente por $N(t)$.

Así, un proceso de conteo se define como un proceso estocástico $\{N(t), t \geq 0\}$ que satisface las siguientes condiciones:

1. $N(t) \geq 0$
2. $N(t)$ es un valor entero.
3. Si $s < t$, $[N(t) - N(s)]$ representa el número de eventos ocurridos en el intervalo de tiempo (s, t) .

Alternativamente, un proceso de conteo puede ser descrito por una secuencia de tiempos de evento (tiempo cronológico registrado al momento de ocurrencia de un evento),

caracterizado por $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$. O por una secuencia de tiempo entre eventos $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$. De cualquier manera, existen al menos 4 tipos de modelos diferentes que permiten describir un proceso de conteo, diferenciados por el tipo de reparación que ocurre al momento de ocurrir un evento, mostrados a continuación:

1. Procesos homogéneos de Poisson.
2. Procesos de renovación.
3. Procesos no homogéneos de Poisson.
4. Procesos de reparación imperfecta.

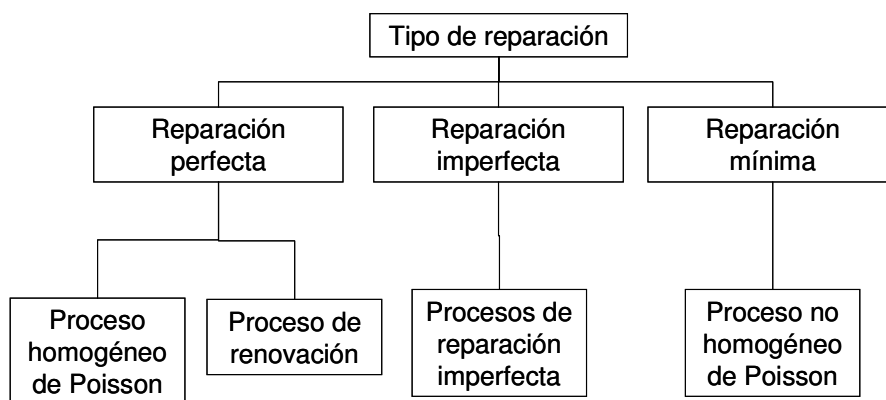


Figura 18. Clasificación de procesos de conteo de eventos por calidad de reparación.

Procesos homogéneos de Poisson

Un proceso de conteo $\{N(t), t \geq 0\}$ es un proceso de Poisson con una tasa λ , con

$\lambda > 0$ si:

1. $N(0) = 0$
2. El proceso tiene incrementos independientes (un proceso de conteo tiene incrementos independientes si para $0 < t_1 < \dots < t_k$ con $k = 2, 3, 4, \dots$ los valores $[N(t_1) - N(0)]$, $[N(t_2) - N(t_1)]$, \dots , $[N(t_k) - N(t_{k-1})]$ son variables aleatorias independientes).

3. El número de eventos en cualquier intervalo de largo t tiene una distribución de Poisson de media λt . Con lo que para todo s con $t > 0$ se cumple que:

$$P(N(t+s) - N(s) = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Es decir, la tasa de ocurrencia de eventos de un proceso homogéneo de Poisson es constante e igual a λ , por lo que el número esperado de eventos en el intervalo $(t, t+v)$ está dado por λv .

Procesos de renovación

Para comprender el significado de un proceso de renovación, considérese un componente que es puesto en operación y está funcionando en $t = 0$, cuando la componente falla en T_1 es reemplazada por una componente del mismo tipo o reparada a como si fuera nueva. Cuando esta nueva componente falla en $T_1 + T_2$ es reemplazada nuevamente y así sucesivamente con las siguientes fallas. El número de fallas y renovaciones ocurridas en el intervalo $(0, t)$ se denota por $N(t)$. Se asume que los tiempos entre eventos $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$ son independientes e idénticamente distribuidos.

Entonces un proceso de renovación es un proceso de conteo $\{N(t), t \geq 0\}$ tal que los tiempos entre eventos $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$ son independientes y con una función de distribución dada por:

$$F_T(t) = P(T_i \leq t) \quad \text{para } t \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots$$

Los eventos observados se denominan renovaciones y $F_T(t)$ se denomina la función de distribución subyacente al proceso de renovación. Nótese que un proceso homogéneo de Poisson es un proceso de renovación cuya función de distribución subyacente es

exponencial de parámetro λ , por lo que puede decirse que un proceso de renovación es una generalización de un proceso homogéneo de Poisson.

Finalmente, si se desea calcular la probabilidad de ocurrencia de un número determinado de eventos, ésta está dada por:

$$P(N(t) = n) = P(N(t) \geq n) - P(N(t) \geq n+1) = F^{(n)}(t) - F^{(n+1)}(t)$$

Procesos no homogéneos de Poisson

En términos simples, en un proceso no homogéneo de Poisson la tasa de ocurrencia de eventos λ se generaliza en función del tiempo, denominándose función de intensidad y denotándose por $w(t)$.

Un proceso de conteo $\{N(t), t \geq 0\}$ es un proceso no homogéneo de Poisson de función de intensidad $w(t)$ para $t \geq 0$ si:

1. $N(0) = 0$
2. $\{N(t), t \geq 0\}$ tiene incrementos independientes.
3. $P(N(t + \Delta t) - N(t) \geq 2) = o(\Delta t)$; es decir, el sistema no experimenta más de un evento al mismo tiempo.
4. $P(N(t + \Delta t) - N(t) = 1) = w(t) \cdot \Delta t + o(t)$

En este caso, puede calcularse el número esperado de eventos en un intervalo de tiempo $(v, v+t)$ mediante la siguiente relación:

$$E(N(v+t) - N(v)) = W(v+t) - W(v) = \left(\int_0^{v+t} w(u) \cdot \delta u \right) - \left(\int_0^v w(u) \cdot \delta u \right) = \int_v^{v+t} w(u) \cdot \delta u$$

Además, la probabilidad que el número de eventos en el intervalo $(v, v+t)$ sea igual a n está dada por:

$$P(N(v+t) - N(v) = n) = \frac{[W(t+v) - W(v)]^n}{n!} e^{-[W(t+v) - W(v)]} = \frac{\left[\int_v^{v+t} w(u) \cdot \delta u \right]^n}{n!} \cdot e^{-\int_v^{v+t} w(u) \delta u}$$

En este tipo de procesos se dice que el proceso de reparación es mínimo, debido a que el sistema vuelve a estar en estado que estaba justo antes de la ocurrencia del evento.

Procesos de reparación imperfecta

Los procesos de renovación y no homogéneos de Poisson son útiles para describir la ocurrencia de eventos en sistemas reparables. Puede decirse que un proceso homogéneo de Poisson es un caso particular de dichos procesos. Cuando se considera un proceso de renovación, se asume que la componente, luego de fallar, sufre una reparación perfecta, es decir, vuelve a un estado como si fuera nueva. Por otro lado en un proceso no homogéneo de Poisson se dice que la reparación es mínima, pues la componente, luego de la reparación, es devuelta a un estado análogo al que se encontraba justo antes de fallar. Puede considerarse entonces que ambos procesos son dos casos extremos. Existen muchos modelos denominados procesos de reparación imperfecta, en que se considera que, luego de la reparación, el sistema vuelve a un estado intermedio, es decir, peor que como nuevo, pero mejor que como justo antes de fallar.

2.4 Confiabilidad de sistemas mecánicos

Diversos autores han desarrollado múltiples modelos que describen la función de intensidad $w(t)$, para distintos tipos de procesos de conteo de eventos aplicados a la ocurrencia de fallas en un sistema mecánico, particularmente, para un proceso no homogéneo de Poisson se destacan:

1. Modelo de potencia
2. Modelo lineal
3. Modelo logarítmico

Modelo de potencia

En un modelo de potencia, la función de intensidad de un proceso no homogéneo de Poisson se define como:

$$w(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad \text{para } \lambda > 0, \beta > 0 \text{ y } t \geq 0$$

$$W(t) = \lambda t^\beta \quad \lambda > 0, \beta > 0$$

Según lo presentado en párrafos anteriores, la probabilidad de que ocurran n eventos en el intervalo $(v, v+t)$ en un proceso no homogéneo de Poisson se calcula como:

$$P(N(v+t) - N(v) = n) = \frac{[W(t+v) - W(v)]^n}{n!} e^{-[W(t+v) - W(v)]}$$

Por lo que la probabilidad de ocurrencia de la primera falla ($n=1$) en el intervalo $(0, t)$, que se interpreta como la confiabilidad de un sistema mecánico, toma la siguiente forma cuando $W(t) = at^b$:

$$P[N(t) - N(0) = 1] = \frac{(at^b)^1 e^{-at^b}}{1!} = \frac{a^1 t^{b1} e^{-at^b}}{1!} = at^b e^{-at^b}$$

Modelo lineal

En un modelo lineal, la función de intensidad de un proceso no homogéneo de Poisson se define como:

$$w(t) = \lambda \cdot (1 + \alpha t) \quad \text{para } \lambda > 0 \text{ y } t \geq 0$$

El modelo lineal ha sido discutido por Vesely (1991) y Atwood (1992). Un sistema reparable modelado por un modelo lineal está empeorando (tasa de fallas creciente) si $\alpha > 0$ y mejorando (tasa de fallas decreciente) si $\alpha < 0$. Si $\alpha < 0$, tarde o temprano $w(t)$ será menor que cero, lo que vuelve inútil al modelo.

Modelo logarítmico

En un modelo logarítmico, la función de intensidad de un proceso no homogéneo de Poisson se define como:

$$w(t) = e^{\alpha + \beta t} \quad \text{para } -\infty < \alpha, \beta < \infty \text{ y } t \geq 0$$

Un modelo logarítmico está mejorando si $\beta < 0$ y deteriorándose si $\beta > 0$. Cuando $\beta = 0$ el modelo logarítmico se reduce a un proceso homogéneo de Poisson.

2.5 Confiabilidad aplicada a la planificación de producción

Un sistema minero subterráneo se compone de numerosas excavaciones. Estas excavaciones corresponden a las componentes o subsistemas de la mina (Kazakidis y Scoble, 2002), como se muestra esquemáticamente en la siguiente figura:

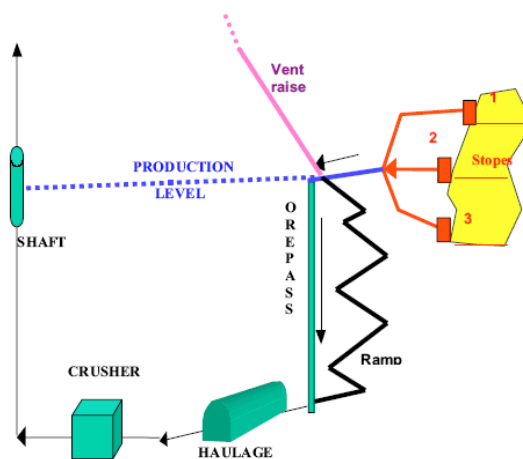


Figura 19. Descomposición de sistema minero en componentes (Kazakidis y Scoble, 2002).

Dependiendo del tipo de componente (piques de traspaso, caserones, túneles, etc.), éstas se ven afectadas por diferentes tipos de interferencias operacionales, entendiéndose a éstas últimas como aquellas interrupciones que generan retrasos o sobrecostos durante el desarrollo o las operaciones de la mina (Kazakidis y Scoble, 2002). Para considerar la ocurrencia de este tipo de eventos en el proceso de planificación de producción, cada componente puede ser descrita por una curva de intensidad o ROCOF (Rate of occurrence of failure), de características similares a la de los sistemas mecánicos.

Particularmente, en el estudio realizado por Kazakidis y Scoble (2002), esta función de intensidad es dependiente del tiempo y su modelo de confiabilidad permite calcular la probabilidad de que una componente no falle (no se vea afectada por un evento de interferencia) en un intervalo temporal dado, según los siguientes modelos (derivados de la teoría de los procesos de Poisson):

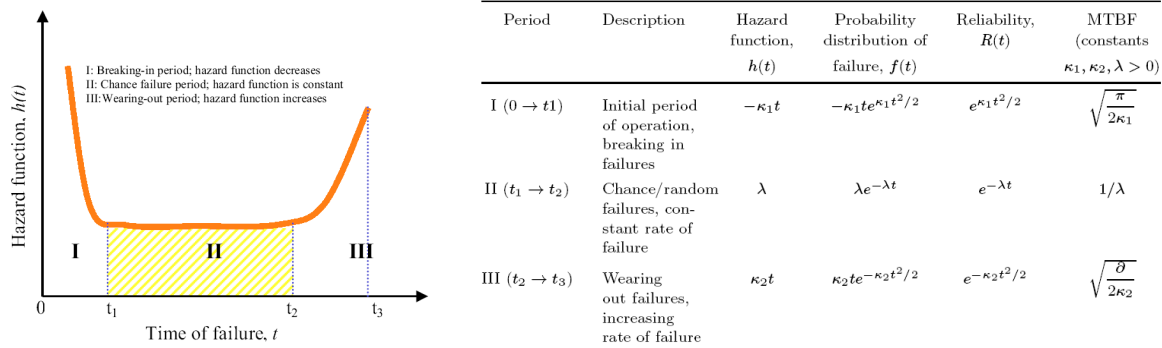


Figura 20. Izquierda: curva tipo para modelar la función de intensidad (Kazakidis y Scoble, 2002). Derecha: Modelos considerados para representar curva bathtub en diferentes etapas (Kazakidis y Scoble, 2002).

La confiabilidad de un programa de producción puede definirse como la probabilidad de lograr un objetivo productivo definido (Rubio, 2006). Esta probabilidad es directamente proporcional a la probabilidad de que exista suficiente infraestructura disponible para alcanzar la meta productiva. La confiabilidad es también dependiente del tiempo debido a que tanto los programas de producción como las características del sistema minero (en relación a la ocurrencia de fallas) cambian de periodo en periodo. Lo anterior se resume en que no existe un único número que represente la confiabilidad de un plan de producción, si no más bien un vector que cuantifica la confiabilidad de cada periodo del programa.

Para Rubio (2006) un modelo de confiabilidad aplicado a la programación de producción no sólo permite calcular la confiabilidad de un determinado programa, también puede ser usado para proponer cambios en la secuencia de apertura de puntos de extracción y las capacidades productivas. Además puede utilizarse para estimar las capacidades productivas para un cierto nivel de confiabilidad en base a la infraestructura disponible. En este estudio, centrado en la minería de hundimiento por bloques, la función de intensidad

que describe la tendencia a la falla de una componente presenta al tonelaje (y no al tiempo) como la medida de envejecimiento. La siguiente gráfica muestra la curva ROCOF de puntos de extracción de diferentes minas, considerando al tonelaje como medida de envejecimiento:

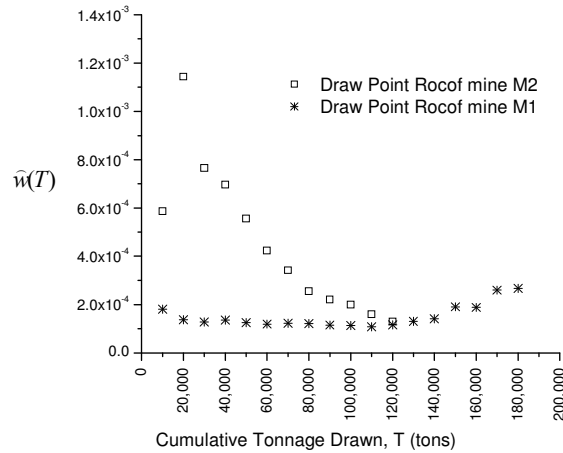


Figura 21. Curva de intensidad de falla para puntos de extracción (Rubio, 2006).

La confiabilidad de una componente se calcula consecuentemente asumiendo como conocida la función de intensidad y el tonelaje planificado para dicha componente:

$$R(T + \Delta T) = \exp\left(- \int_T^{T+\Delta T} w(u) \cdot du\right)$$

Donde:

- $R(T + \Delta T)$ es la confiabilidad del punto de extracción (que presenta una madurez T y tiene un tonelaje planificado ΔT).

El cálculo de la confiabilidad del plan de producción en base a sus componentes puede realizarse como muestra esquemáticamente la siguiente figura, que se basa en los modelos de conexión presentados con anterioridad:

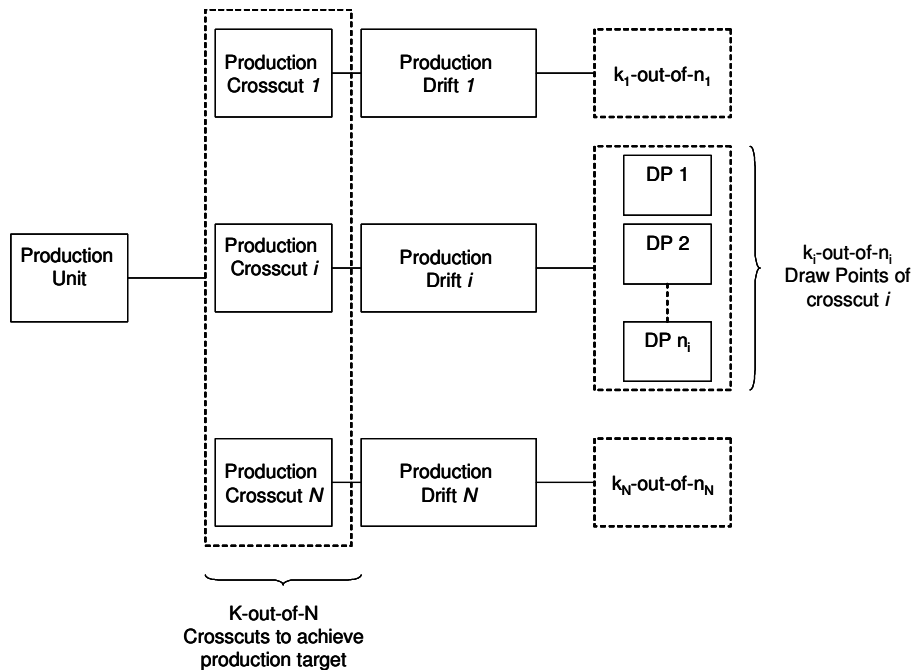


Figura 22. Diagrama de conexión en bloques para el cálculo de confiabilidad de un programa de producción (Rubio, 2006).

Una unidad de producción es un área de la mina de geología, características geotécnicas y ubicación de facilidades logísticas particulares. Cada unidad de producción se modela como la conexión en K out of N de cruzados de producción. Por su parte, cada cruzado de producción se compone de un túnel de producción conectado en serie con la conexión en K out of N de los puntos de extracción relacionados.

Salamanca (2007) adaptó el modelo de confiabilidad de Rubio (2006) para considerar la infraestructura en otros niveles productivos de una mina de panel caving, considerando puntos de extracción, cruzados de producción, piques de traspaso y cruzados de acarreo conectados según el siguiente diagrama:

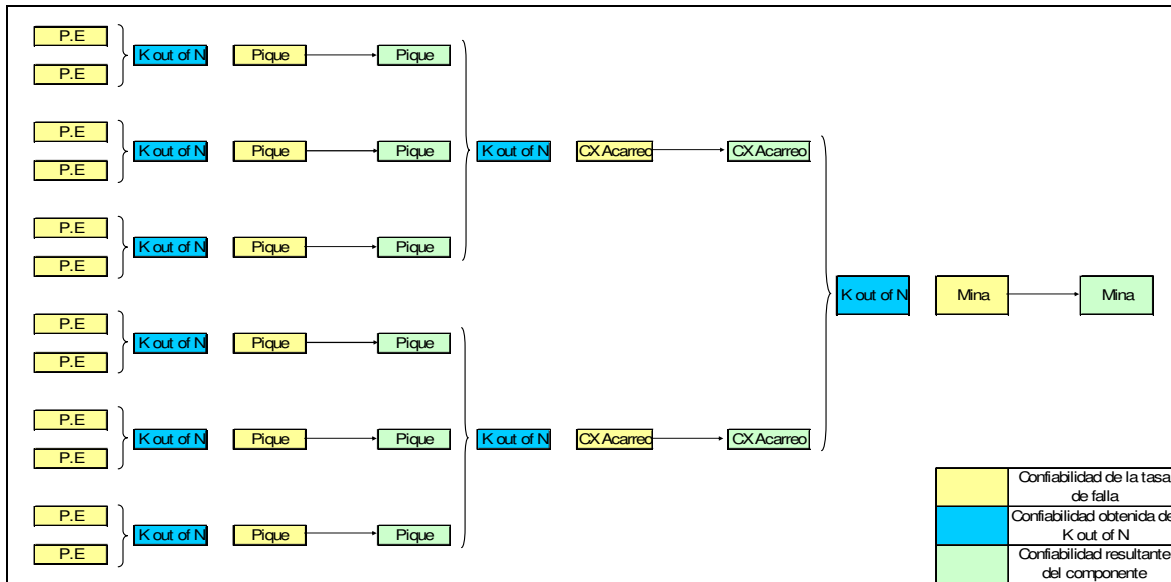


Figura 23. Diagrama de conexión en bloques para el cálculo de confiabilidad de un programa de producción en un sistema minero multinivel (Salamanca, 2007).

Un aspecto relevante del modelo presentado por Salamanca es que las únicas componentes que tienen una confiabilidad propia son los puntos de extracción, cuyo valor se calcula directamente de una curva ROCOF parametrizada según un modelo de potencia, como la probabilidad de ocurrencia del primer evento. La confiabilidad de las demás componentes de infraestructura (cruzados de producción, piques y cruzados de transporte) es resultado de la anidación consecutiva de componentes en conexión K out of N, es decir, por ejemplo, la confiabilidad del pique de traspaso es la confiabilidad del sistema K out of N del sistema de puntos de extracción de un cruzado de producción específico. De manera similar, la confiabilidad de un cruzado de acarreo es la confiabilidad del sistema redundante de piques de traspaso, finalmente, la confiabilidad de la mina se calcula como la conexión K out of N de los cruzados de acarreo respectivos. Debe notarse que este tipo de anidación permite considerar el diseño minero en el modelo de confiabilidad.

Además de las utilidades que encontró Rubio (2006) para un modelo de confiabilidad, Salamanca (2007) introduce el concepto de Tonelaje Libre de Riesgo del plan de producción, entendido como el tonelaje máximo que es posible extraer (de una componente o el sistema completo) con una confiabilidad del 100%, este concepto permite comprender de mejor forma que las capacidades productivas de una mina son

limitadas y tienen directa relación con la infraestructura disponible. Así, para Salamanca (2007), el fin de la teoría de la confiabilidad es buscar el mayor aprovechamiento de los recursos en materia de utilización de la infraestructura disponible de la mina, de esta forma se tendrán las holguras necesarias para enfrentar las interrupciones operacionales.

3 Modelo de confiabilidad multinivel

El modelo de confiabilidad propuesto en este trabajo se basa en las siguientes definiciones:

- Confiabilidad (del programa de producción): es la probabilidad de al menos alcanzar el tonelaje objetivo del programa de producción, en el periodo establecido.
- Falla: cuando el sistema minero no cumple los tonelajes establecidos en el intervalo temporal pertinente.
- Evento: interrupción que detiene el flujo de mineral a través de una componente minera, pero que no necesariamente hace fallar al sistema.

3.1 Curvas U

Una curva U muestra la relación entre la frecuencia de ocurrencia de eventos (ROCOF) y la madurez, medida en toneladas extraídas, de una componente minera en particular (puntos de extracción, piques de traspaso, etc.). Se denota por $w(t)$.

Esta curva se utiliza para obtener el número esperado de eventos en el intervalo finito de toneladas $(t_i, t_i + t_i^P)$, donde t_i^P son las toneladas planificadas para la i-ésima componente en un periodo dado y t_i es la madurez actual de ésta. El número esperado de eventos a ocurrir puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$N(t_i, t_i^P) = \int_{t_i}^{t_i + t_i^P} w(t) dt$$

Donde:

- $N(t_i, t_i^P)$ es el número esperado de eventos para la componente i, dado que se desean extraer t_i^P toneladas (tonelaje planificado) y que hasta el momento se han extraído t_i toneladas (madurez).

3.2 Curva de producción característica (PCC)

La curva de producción característica describe la productividad (toneladas por unidad de tiempo) de una componente minera en particular en función del número de eventos en un tiempo determinado. Conceptualmente, permite cuantificar el hecho que el tiempo total se compone del tiempo efectivo de producción y del tiempo de reparaciones (que no puede utilizarse para producir a través de la componente afectada). Si se considera que mientras mayor es el número de toneladas que pasan a través de una componente, mayor es el número esperado de eventos, la subdivisión temporal anterior impacta directamente en la productividad y, necesariamente, debiese observarse que la productividad disminuye conforme aumenta el número de eventos. A modo de ejemplo, el siguiente gráfico muestra como evoluciona la productividad en función del número de eventos, para un cruzado de producción:

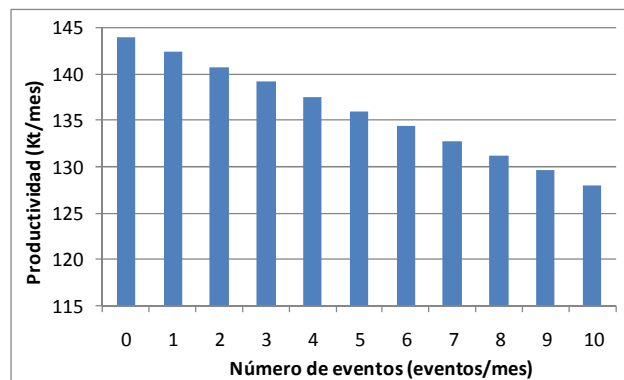


Figura 24. Relación entre productividad y eventos de interferencia en un cruzado de producción.

La característica más relevante de la curva de producción característica es que considera el hecho que para un mismo número de eventos pueden existir varios valores de productividad asociados (por lo que existe una cierta distribución de valores de productividad, cada uno con una cierta probabilidad de ocurrencia descrita por su función de densidad de probabilidad). Esta dispersión de valores se debe al hecho de que muchas de las variables que influyen en la productividad de una componente son de naturaleza aleatoria y continua (densidad del mineral, tiempos de reparación, frecuencia de ocurrencia de eventos de interrupción, velocidad de equipos, etc.). A modo de ejemplo,

la siguiente curva muestra la curva de producción característica de un cruzado de producción, obtenida mediante una simulación de eventos discretos:

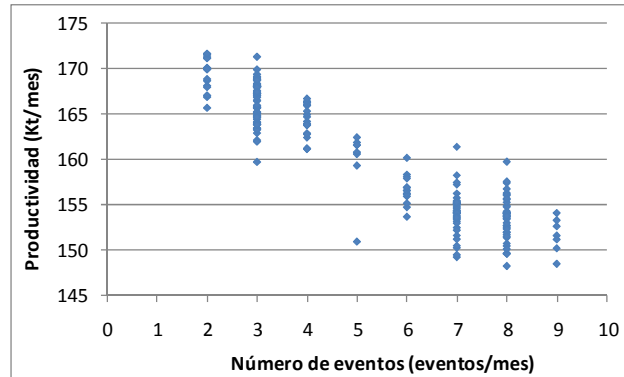


Figura 25. Curva de producción característica de un cruzado de producción.

Puede apreciarse, al igual que en el caso anterior, que la productividad tiende a disminuir conforme aumenta el número de eventos observados, lo que eventualmente podría definir la curva de producción característica como una función de distribución de probabilidades condicional al número de eventos esperados. Por otro lado, dada la naturaleza aleatoria de los eventos de interferencia y otras variables como los tiempos de reparación, tiempos de ciclo, densidades del material, factores de llenado, etc. Se aprecia que para cada número de eventos existen varios valores de productividad posibles. Naturalmente, cada componente del sistema posee una curva de producción característica propia, que refleja las propiedades productivas propias de dicha componente.

Si bien la curva de producción característica describe el comportamiento productivo de una componente de infraestructura minera debe considerarse que, por ejemplo, un cruzado de producción podrá producir una tonelada de material únicamente si existe un equipo LHD operando en dicha componente. Naturalmente, dependiendo de la productividad intrínseca del equipo y otros factores, como la cantidad total de recursos orientados a la reparación de componentes y las estrategias consideradas en su reparación, la productividad de la componente de infraestructura es diferente (Troncoso, 2006). Por lo tanto, si bien la curva PCC no considera explícitamente este hecho, la magnitud de la productividad y su dispersión observada tiene directa relación con éste.

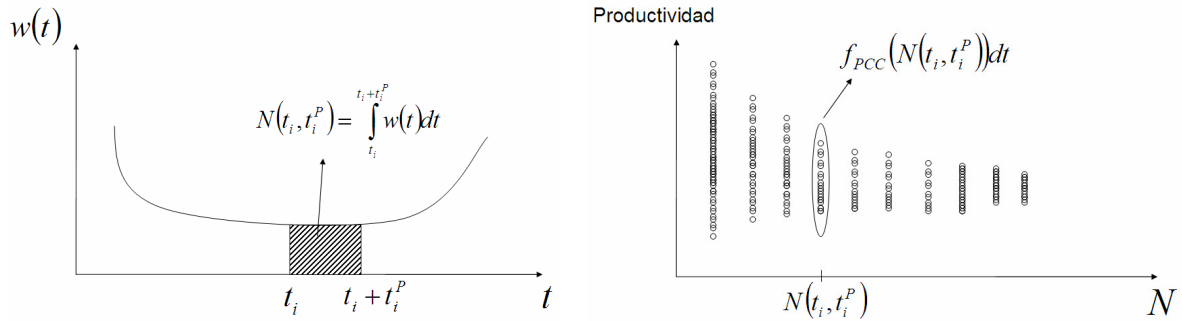
3.3 Confiabilidad de una componente minera

En los trabajos presentados por Rubio (2006) y Salamanca (2007) la confiabilidad de una componente se calcula directamente desde la curva ROCOF, modelada como la función de intensidad de un proceso no homogéneo de Poisson; es decir, se calcula la probabilidad de ocurrencia de un evento y no directamente la probabilidad de alcanzar el tonelaje planificado de la componente en cuestión, por lo tanto, la probabilidad de falla está asociada a la probabilidad de ocurrencia de un evento y no al quiebre del programa de producción.

El enfoque aquí considerado para el cálculo de confiabilidad pretende representar explícitamente el hecho que una componente puede cumplir el programa de producción aunque existan eventos de interferencia mientras se ejecuta el plan. Para esto, dada la definición de confiabilidad presentada en este trabajo, es preciso relacionar el número de eventos a ocurrir en el tonelaje planificado con la productividad asociada. Considerando que el número esperado de eventos es $N(t_i, t_i^P)$, donde t_i^P denota el tonelaje planificado y t_i es la madurez actual de la componente i , y que para un cierto número de eventos, la curva PCC entrega la función de densidad de probabilidad $f_{PCC}(N(t_i, t_i^P))$ para este determinado número esperado de eventos, es posible calcular la confiabilidad de la componente minera i mediante el siguiente formulismo:

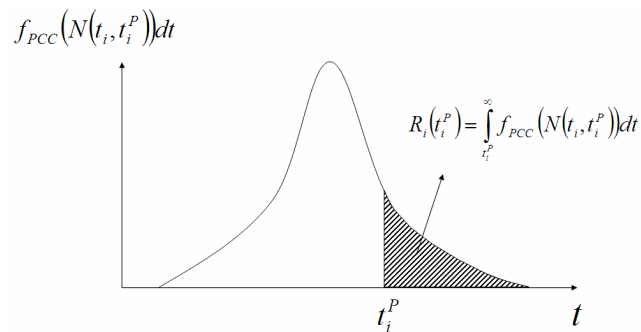
$$R_i(t_i^P) = \int_{t_i^P}^{\infty} f_{PCC}(N(t_i, t_i^P)) dt$$

Expresión cuyo valor corresponde a la probabilidad de que la productividad sea mayor o igual al tonelaje planificado para el intervalo temporal pertinente, dado un número esperado de eventos. Esquemáticamente, el cálculo de la confiabilidad de una componente minera, puede resumirse en el siguiente diagrama:



Paso 1: estimación del número de eventos desde curva U.

Paso 2: muestreo de distribución de productividad desde curva PCC.



Paso 3: cálculo de confiabilidad.

Figura 26. Diagrama esquemático de cálculo de confiabilidad de una componente minera.

3.4 Confiabilidad del nivel de producción

Subsistema cruzado de producción sin pique de traspaso

Un cruzado de producción está conformado por un número finito I de puntos de extracción conectados por un único túnel, como lo muestra el siguiente diagrama:

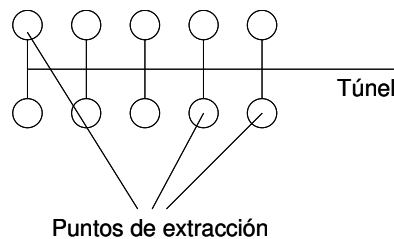


Figura 27. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción.

Puede decirse entonces que un cruzado de producción está compuesto por 2 tipos de componentes: puntos de extracción y el túnel que los comunica. Si se conoce el tonelaje planificado, la curva U y PCC de cada punto de extracción es posible entonces calcular su confiabilidad R_i^{DP} de cada punto de extracción, dónde el superíndice DP es para denotar punto de extracción y el subíndice i para referenciar un punto de extracción específico.

El conjunto de puntos de extracción puede modelarse como un sistema redundante K out of I, donde el número total disponible de puntos será el total de puntos activos de la calle y K (el número necesario de puntos) puede calcularse como:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}}{\sum_{i=1}^I t_i^{N(DP)}} \cdot I$$

Donde $t_i^{N(DP)}$ es el tonelaje nominal del punto de extracción i y corresponde al máximo tonelaje extraíble desde dicho punto en el periodo planificado, y $t_i^{P(DP)}$ es su tonelaje planificado. Este sistema K out of I está conectado en serie con el túnel, que tiene su propia confiabilidad. Claramente, el tonelaje planificado del túnel de producción está dado por la suma de los tonelajes planificados de los puntos de extracción asociados:

$$t_j^{P(PC)} = \sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}$$

Donde $t_j^{P(PC)}$ es el tonelaje planificado del túnel de producción (el superíndice PC es para denotar túnel de producción y el subíndice j para referenciar un túnel específico). De la misma forma que para cualquier componente, para calcular la confiabilidad del túnel de producción es preciso conocer su tonelaje planificado, dado por la expresión anterior, su curva PCC y el número esperado de eventos. Con respecto a esto último, debe entenderse que el cierre del cruzado de producción es para la reparación de los puntos de extracción asociados. Se propone el siguiente formulismo para el cálculo del número de eventos de la calle de producción:

$$N_j^{PC} = \frac{\sum_{i=1}^I N_i^{DP}}{RS_j^{PC}}$$

Donde N_j^{PC} es el número esperado de eventos de la calle j, N_i^{DP} es el número esperado de eventos del punto de extracción i y RS_j^{PC} es la estrategia de reparación de la calle j, entendiendo como estrategia de reparación el número de puntos de extracción detenidos para el cual se toma la decisión de cerrar la calle completa para la reparación de puntos (incluso aquéllos puntos que aún están operativos). Por lo tanto, conocido el número de eventos esperados y la curva de producción característica de la calle en cuestión, se puede calcular la confiabilidad $R_j^{PC}(t_j^{P(PC)})$ del túnel de producción.

Finalmente, puede calcularse la confiabilidad del sistema cruzado de producción (considerando el túnel de producción y puntos de extracción) de la siguiente forma:

$$R_j^{DP-PC}(t_j^{P(DP-PC)}) = \left\{ R_i^{DP}(t_i^{P(DP)}) \right\}_K^I \cdot R_j^{PC}(t_j^{P(PC)})$$

Donde R_j^{DP-PC} es la confiabilidad del subsistema conformado por puntos de extracción y el túnel de producción, y $t_j^{P(DP-PC)}$ es su tonelaje planificado. Se infiere, por balance de masas, que debe cumplirse que:

$$t_j^{P(DP-PC)} = t_j^{P(PC)} = \sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}$$

Subsistema cruzado de producción con 1 pique de traspaso

Si se considera ahora que el tonelaje movido a través del cruzado de producción debe vaciarse a un único pique de traspaso se agrega una nueva componente al subsistema cruzado de producción, quedando como la siguiente figura:

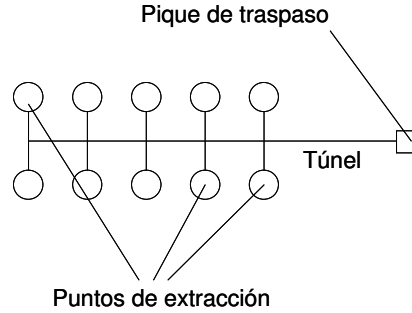


Figura 28. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con pique de traspaso.

Lógicamente, la única salida del mineral ingresado al sistema por los puntos de extracción es el pique de traspaso, por lo que necesariamente (balance de masas) debe cumplirse que:

$$t_s^{P(OP)} = t_j^{P(PC)} = \sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}$$

Donde $t_s^{P(OP)}$ es el tonelaje planificado del pique de traspaso (el superíndice OP es para denotar pique de traspaso y el subíndice s para referenciar un pique específico). Por lo tanto, si se conocen la curva U y PCC del pique de traspaso, se puede calcular su confiabilidad $R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$. Esta nueva componente se encuentra en serie con el subsistema conformado por los puntos de extracción y el túnel de producción, por lo tanto, la confiabilidad de este nuevo sistema estará dada por:

$$R_j^{DP-PC-OP}(t_j^{P(DP-PC-OP)}) = \{R_i^{DP}(t_i^P)\}_K^I \cdot R_j^{PC}(t_j^{P(PC)}) \cdot R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$$

Cumpléndose (por balance de masas) que:

$$t_j^{P(DP-PC-OP)} = t_s^{P(OP)} = t_j^{P(PC)} = \sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}$$

Donde $t_j^{P(DP-PC-OP)}$ es el tonelaje planificado para el cruzado de producción (el subíndice j es para referenciar un cruzado de producción específico y el superíndice DP-PC-OP es para denotar el subsistema conformado por puntos de extracción, túnel de producción y el pique de traspaso).

Subsistema cruzado de producción con múltiples piques de traspaso

Hasta ahora se consideró únicamente que un cruzado de producción está compuesto por un único pique de traspaso, lo que no necesariamente es cierto para un sistema minero cualquiera. Considérese ahora el cruzado de producción de la siguiente figura, dónde pueden existir cualquier número de piques de traspaso para un único cruzado de producción:

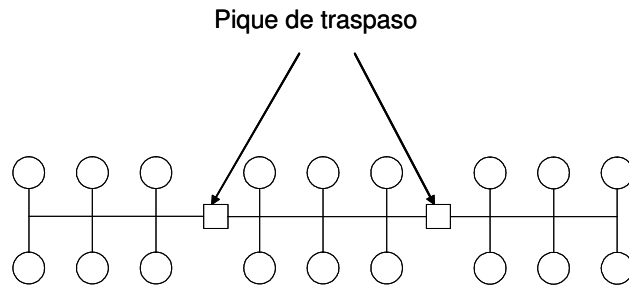


Figura 29. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con múltiples piques de traspaso.

Considerando la confiabilidad del subsistema conformado por puntos de extracción y túnel de producción como conocida y con el valor $R_j^{DP-PC}(t_j^{P(DP-PC)})$, puede entenderse que éste está conectado en serie con un sistema redundante Q out of S de piques de traspaso, por lo que la confiabilidad del cruzado de producción completo (puntos de extracción, túnel de producción y piques de traspaso) está dada por:

$$R_j^{DP-PC-OP}(t_j^{P(DP-PC-OP)}) = R_j^{DP-PC}(t_j^{P(DP-PC)}) \cdot \{R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})\}_Q^S$$

Donde la confiabilidad $R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$ de cada pique de traspaso puede calcularse pues sus curvas U y PCC son conocidas, y el tonelaje planificado $t_s^{P(OP)}$ es conocido. S corresponde

al número total de piques en el cruzado de producción j y Q es el número necesario de piques para cumplir el tonelaje planificado del cruzado de producción. En este caso, necesariamente debe cumplirse que (por balance de masas):

$$t_j^{P(DP-PC-OP)} = t_j^{P(PC)} = \sum_{s=1}^S t_s^{P(OP)}$$

El número Q de piques de traspaso necesarios para cumplir el plan de producción puede calcularse mediante el siguiente formulismo:

$$Q = \frac{\sum_{s=1}^S t_s^{P(OP)}}{\sum_{s=1}^S t_s^{N(OP)}} \cdot S$$

Donde $t_s^{N(OP)}$ es el tonelaje nominal del pique de traspaso s , y $t_s^{P(OP)}$ su tonelaje planificado.

Confiabilidad del nivel de producción como sistema independiente

La siguiente figura muestra la esquematización del nivel de producción:

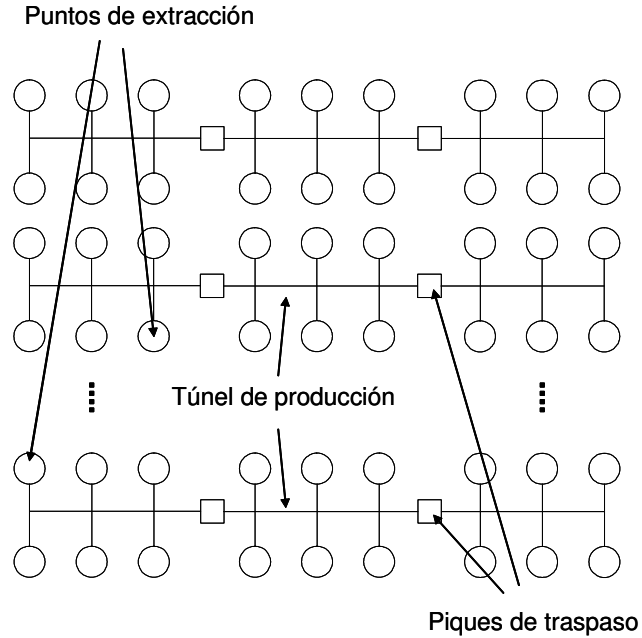


Figura 30. Esquema de conectividad de componentes de un nivel de producción como sistema independiente.

Se entiende que el nivel de producción está conformado por múltiples cruzados de producción (subsistema conformado por puntos de extracción, túneles de producción y piques de traspaso). Considérese ahora conocida la confiabilidad de cada cruzado de producción cuyos valor es representado por $R_j^{DP-PC-OP} (t_j^{P(DP-PC-OP)})$.

Puede entenderse que el nivel de producción es un sistema redundante de cruzados de producción, dónde el número total de cruzados de producción disponibles es J y el número necesario de cruzados de producción es X , cuyo valor puede calcularse como:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^J t_j^{P(DP-PC-OP)}}{\sum_{j=1}^J t_j^{N(DP-PC-OP)}} \cdot J$$

Donde $t_j^{N(DP-PC-OP)}$ es el tonelaje nominal del cruzado de producción j (compuesto por puntos de extracción, túnel de producción y piques de traspaso). En este aspecto, es importante destacar que el tonelaje nominal corresponde a la capacidad máxima que cada

componente de este sistema redundante es capaz de producir. Debido a que la componente cruzado de producción está compuesto por otras componentes, en este caso el tonelaje nominal del cruzado de producción j está dado por:

$$t_j^{N(DP-PC-OP)} = \min \left(\sum_{i=1}^I t_i^{N(DP)}; t_j^{N(PC)}; \sum_{s=1}^S t_s^{N(OP)} \right)$$

Finalmente, la confiabilidad del nivel de producción como sistema independiente está dada por la siguiente ecuación:

$$R^{PL}(t^{P(PL)}) = \left\{ R_j^{DP-PC-OP}(t_j^{P(DP-PC-OP)}) \right\}_X^J$$

Dónde R^{PL} es la confiabilidad del nivel de producción y $t^{P(PL)}$ su tonelaje planificado, el cual, necesariamente debe cumplir con:

$$t^{P(PL)} = \sum_{j=1}^J t_j^{P(DP-PC-OP)}$$

3.5 Confiabilidad del nivel de transporte

Subsistema cruzado de transporte

Básicamente un cruzado de transporte está conformado por un número finito P de piques de traspaso conectados por un único túnel, como lo muestra el siguiente diagrama:

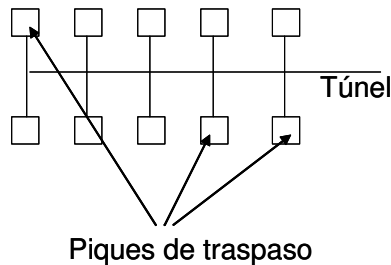


Figura 31. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de transporte.

Puede decirse entonces que un cruzado de transporte está compuesto por 2 tipos de componentes: piques de traspaso y el túnel que los comunica. El subsistema cruzado de transporte es similar al subsistema cruzado de producción, donde los piques de traspaso (en conexión con las componentes situadas aguas arriba) son análogos a los puntos de extracción y el túnel de transporte es análogo al túnel de producción. Para el desarrollo posterior, se asume que la confiabilidad del subsistema situado aguas arriba de cada pique de traspaso dada por $R_u^{DP-PC-OP}(t_u^{P(DP-PC-OP)})$ es conocida (el subíndice u es para referenciar un pique de traspaso específico en el nivel de transporte).

Al igual que el cruzado de producción, el cruzado de transporte está compuesto por un sistema redundante de piques de traspaso conectado en serie con un único túnel de transporte. El número total U de piques de traspaso corresponde al total de piques en el cruzado de transporte h, el número necesario B de piques de traspaso puede ser calculado de la siguiente manera:

$$B = \frac{\sum_{u=1}^U t_u^{P(DP-PC-OP)}}{\sum_{u=1}^U t_u^{N(DP-PC-OP)}} \cdot U$$

Conocido el tonelaje planificado $t_u^{P(DP-PC-OP)}$ de cada pique de traspaso y su curva U, es posible calcular el número esperado de eventos, denotado por $N_u^{OP}(t_u^{P(DP-PC-OP)})$. Similarmente al caso del cruzado de producción, se asume que el cierre del túnel de transporte es para la reparación de piques de traspaso, por lo que el número esperado de eventos a ocurrir en el túnel de transporte está dado por:

$$N_h^{HC} = \frac{\sum_{u=1}^U N_u^{OP}}{RS_h^{OP}}$$

Donde N_h^{HC} es el número esperado de eventos y RS_h^{OP} es la estrategia de reparación del túnel de transporte h. Entendiendo como estrategia de reparación el número de piques de traspaso detenidos para el cual se toma la decisión de cerrar el túnel de transporte

completo para la reparación de piques de traspaso. Por lo tanto, conocido el número de eventos esperados y la curva de producción característica del túnel en cuestión, se puede calcular la confiabilidad $R_h^{HC}(t_h^{P(HC)})$ del túnel de transporte. Obviamente, por balance de masas se debe cumplir que:

$$t_h^{P(HC)} = t_h^{P(DP-PC-OP-HC)} = \sum_{u=1}^U t_u^{P(DP-PC-OP)}$$

Por lo tanto, la confiabilidad del subsistema cruzado de transporte está dada por la siguiente expresión:

$$R_h^{DP-PC-OP-HC}(t_h^{P(DP-PC-OP-HC)}) = \left\{ R_u^{OP}(t_u^{P(DP-PC-OP)}) \right\}_B^U \cdot R_h^{HC}(t_h^{P(HC)})$$

Confiabilidad del nivel de transporte como sistema independiente

La siguiente figura muestra el nivel de transporte como sistema independiente:

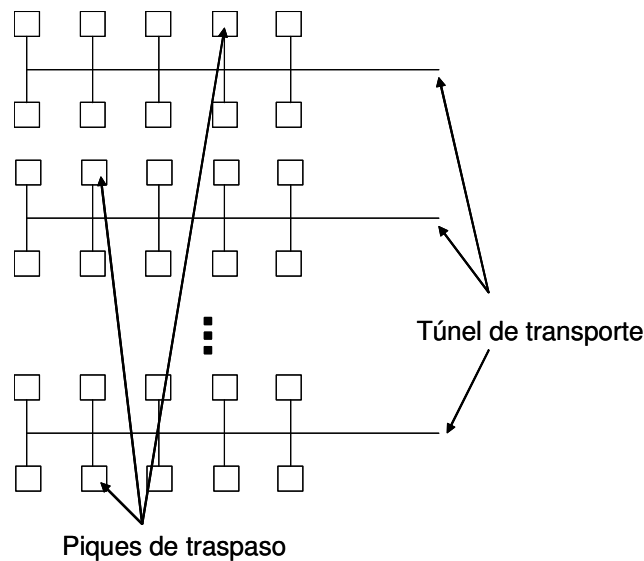


Figura 32. Esquema de conectividad de componentes en un nivel de transporte como sistema independiente.

Se entiende que el nivel de transporte está conformado por múltiples cruzados de transporte (subsistema conformado por piques de traspaso y túneles de transporte).

Considérese ahora conocida la confiabilidad de cada cruzado de transporte cuyo valor es representado por $R_h^{DP-PC-OP-HC} \left(t_h^{P(DP-PC-OP-HC)} \right)$.

El nivel de transporte puede modelarse entonces como un sistema redundante de cruzados de transporte W out of H, donde el número total H de cruzados de transporte corresponde al total de cruzados de transporte en el respectivo nivel, y el número necesario W de cruzados puede calcularse como:

$$W = \frac{\sum_{h=1}^H t_h^{P(DP-PC-OP-HC)}}{\sum_{h=1}^H t_h^{N(DP-PC-OP-HC)}} \cdot H$$

Donde $t_h^{P(DP-PC-OP-HC)}$ es el tonelaje planificado de cada cruzado de transporte y $t_h^{N(DP-PC-OP-HC)}$ corresponde a su tonelaje nominal, que puede calcularse de la siguiente forma:

$$t_h^{N(DP-PC-OP-HC)} = \min \left(\sum_{u=1}^U t_u^{N(DP-PC-OP)}, t_h^{N(HC)} \right)$$

Quedando así el sistema nivel de transporte completamente determinado.

3.6 Conexión de niveles de producción y transporte

Esquemáticamente, la siguiente figura representa los niveles de producción y transporte como un único sistema productivo:

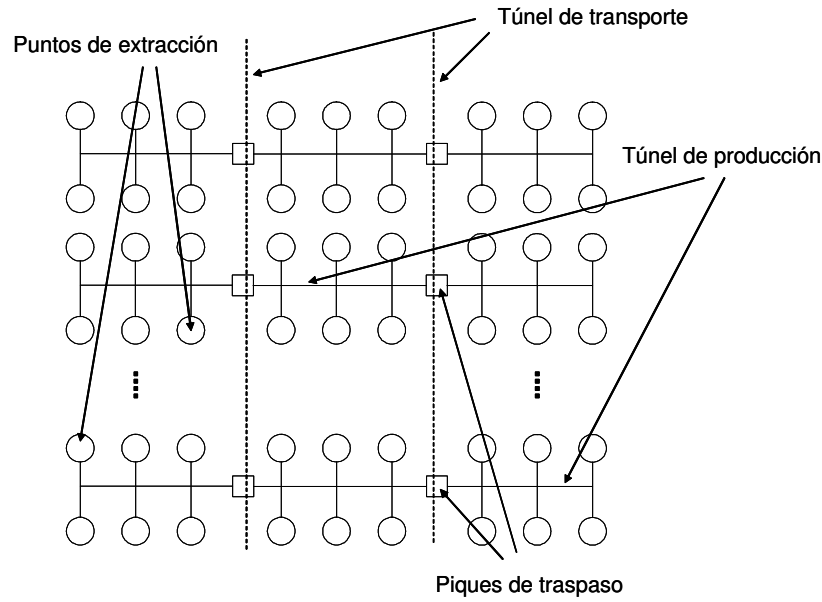


Figura 33. Esquema de conectividad de componentes en un sistema minero multinivel.

Podría decirse que la confiabilidad de este sistema queda completamente definida por los modelos expuestos anteriormente, donde es posible conocer la confiabilidad de cada componente del modelo y luego, la confiabilidad del sistema completo. Sin embargo, el modelo de confiabilidad del nivel de transporte como sistema independiente asume que la confiabilidad $R_u^{DP-PC-OP}(t_u^{P(DP-PC-OP)})$ de cada pique de traspaso es conocida para cada uno de éstos por separado, pero, por otro lado, en el modelo de confiabilidad del nivel de producción como sistema independiente, la confiabilidad del subsistema cruzado de producción (compuesto por puntos de extracción, túnel de producción y múltiples piques de traspaso) no permite obtener la confiabilidad de cada pique por separado, pues sólo especifica la confiabilidad del subsistema redundante de piques de traspaso y no de cada uno de ellos de manera independiente, por lo que el sistema completo, es decir, aquel que considera los niveles de producción y transporte de manera conjunta, aún no está completamente definido, pues un túnel de transporte puede, eventualmente, conectar piques de traspaso de diferentes cruzados de producción (como el caso representado en el diagrama anterior).

Por lo anterior, se hace necesario calcular la confiabilidad de cada pique de traspaso por separado (considerando los puntos de extracción y túneles de producción asociados). Cuando existe sólo un pique de traspaso por cruzado de producción, el problema queda

resuelto considerando que la confiabilidad de cada pique de traspaso, de cada cruzado de producción, está dada por:

$$R_s^{DP-PC-OP}(t_s^{P(DP-PC-OP)}) = \{R_i^{DP}(t_i^P)\}_K^U \cdot R_j^{PC}(t_j^{P(PC)}) \cdot R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$$

Sin embargo, cuando existe más de un pique de traspaso por cada cruzado de producción, la asociación de puntos de extracción a un pique de traspaso específico no es directa, pues existe la posibilidad que el tonelaje extraído desde un punto de extracción específico se vacíe a cualquiera de los múltiples piques existentes en el cruzado. Para encontrar la confiabilidad de cada pique de traspaso (considerando las componentes situadas aguas arriba) considérese, el siguiente diagrama:

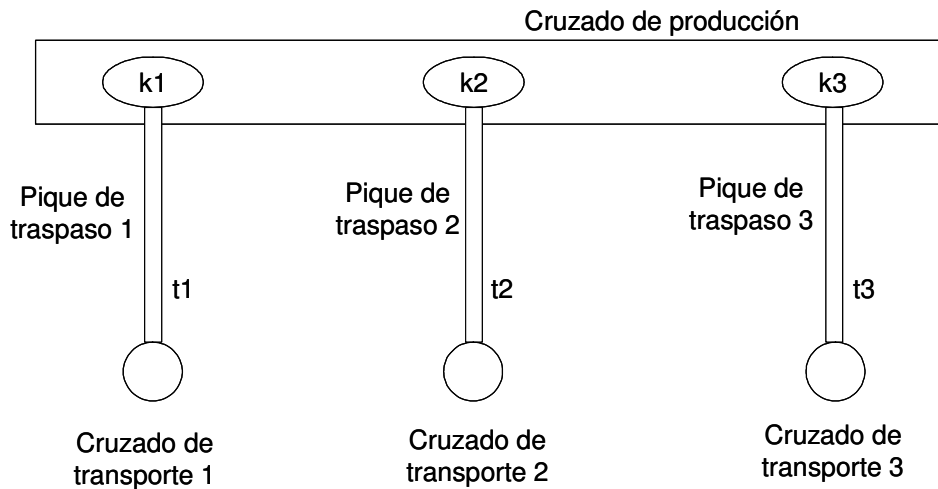


Figura 34. Esquema de conexión entre nivel de producción y acarreo.

El diagrama anterior representa un cruzado de producción con un total de U piques de traspaso donde $t_u^{P(OP)}$ es el tonelaje planificado del pique u . Por su parte, el número total de puntos de extracción activos es I y la confiabilidad de cada componente por separado puede obtenerse desde de sus curvas U y PCC respectivas. El cálculo de la confiabilidad de cada pique de traspaso se basa en considerar que existe un total I de puntos de extracción disponibles de los cuales se necesitan únicamente K_u , que puede calcularse como:

$$K_u = \frac{t_u^{P(OP)}}{\sum_{i=1}^I t_i^{N(DP)}} \cdot I$$

Obsérvese que el numerador de la expresión anterior corresponde al tonelaje planificado del pique de traspaso y no a la suma del tonelaje de todos los puntos de extracción del cruzado. Finalmente, la confiabilidad del pique de traspaso u queda determinada por:

$$R_u^{DP-PC-OP} = \left\{ R_i^{DP} \left(t_i^{P(DP)} \right) \right\}_{K_u} \cdot R_j^{PC} \left(t_j^{P(PC)} \right) \cdot R_u^{OP} \left(t_u^{P(OP)} \right)$$

3.7 Resolución del sistema K out of N

La conexión en K out of N permite calcular la confiabilidad de un sistema redundante donde K es el número mínimo de componentes necesarias para que el sistema funcione y N el número total de componentes disponibles. Dado que eventualmente las confiabilidades de todas las componentes de un subsistema conectadas en K out of N son diferentes, se considera que la confiabilidad puede calcularse mediante:

$$R^{SIST} = \sum_{i=K}^N R_e(i, N)$$

En la expresión anterior, el término $R_e(i, N)$ corresponde a la probabilidad de que exactamente i de N componentes estén en funcionamiento. El valor de este término puede calcularse mediante la siguiente relación recursiva (ver anexos para detalle de su implementación en VBA):

$$R_e(i, j) = (1 - R_j) \cdot R_e(i, j-1) + R_j \cdot R_e(i-1, j-1) \quad 0 \leq i \leq N \quad 0 \leq j \leq N$$

Considerando las siguientes condiciones de borde:

$$R_e(-1, j) = R_e(j+1, j) = 0 \quad \text{para } j = 0, 1, 2, \dots$$

$$R_e(0, 0) = 1$$

Además de la confiabilidad de cada una de las componentes, el formulismo anterior precisa de valores enteros para K y N. Sin embargo, la metodología considerada para la determinación del número necesario de componentes puede generar valores no enteros para K, lo que no permite su aplicación directa para el cálculo de la confiabilidad del sistema.

La primera y más simple aproximación es el redondeo de K al entero más cercano, sin embargo, cuando por ejemplo, K es igual a 8.5 y redondeado a 8 para la resolución, la confiabilidad del sistema está siendo sobreestimada debido a que existen 0.5 puntos de extracción (en términos de tonelaje) que son necesarios para alcanzar el tonelaje planificado, pero que no son considerados. Por otro lado, cuando K es redondeado a 9, la confiabilidad del sistema está siendo subestimada debido a que existen 0.5 puntos de extracción (en términos de tonelaje) que no son necesarios para cumplir el tonelaje planificado pero que son igualmente considerados. Algo similar ocurre para cualquier valor en el intervalo entre 8 y 9. Este problema puede afectar seriamente el cálculo de la confiabilidad del sistema completo por arrastre del error de aproximación.

Por lo anterior, conocidos los valores de K (no entero), N y la confiabilidad de cada componente (R_i), el modelo de confiabilidad propuesto considera el siguiente algoritmo para resolver el sistema K out of N:

1. Calcular el valor denotado por K^{-1} como el entero inferior más cercano a K.
2. Calcular la confiabilidad del sistema K^{-1} out of N (denotada por R^{-1}).
3. Calcular el valor denotado por K^{+1} como el entero superior más cercano a K.
4. Calcular la confiabilidad del sistema K^{+1} out of N (denotada por R^{+1}).
5. Calcular la confiabilidad del sistema K out of N (denotada por R) como la interpolación lineal entre los puntos $(K^{-1}; R^{-1})$ y $(K^{+1}; R^{+1})$, como lo muestra el siguiente gráfico:

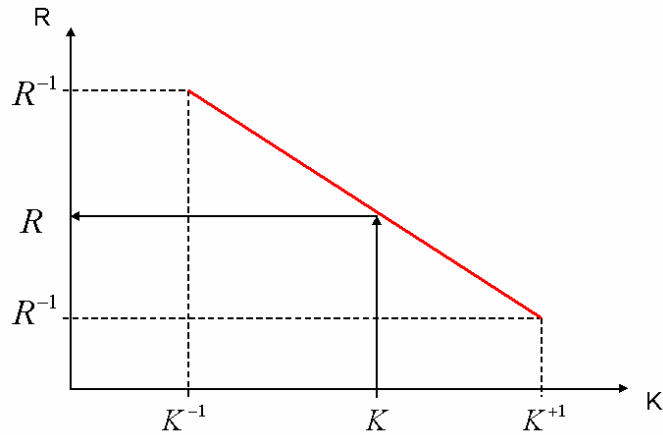


Figura 35. Interpolación lineal para la resolución del sistema K out of N.

Por ejemplo, si se considera un sistema compuesto por 10 componentes, cada una con confiabilidad 0.7, el siguiente gráfico muestra la evolución de la confiabilidad del sistema conforme aumenta el valor de K desde 0 hasta 10 con incrementos de 0.1 con y sin considerar la interpolación propuesta:

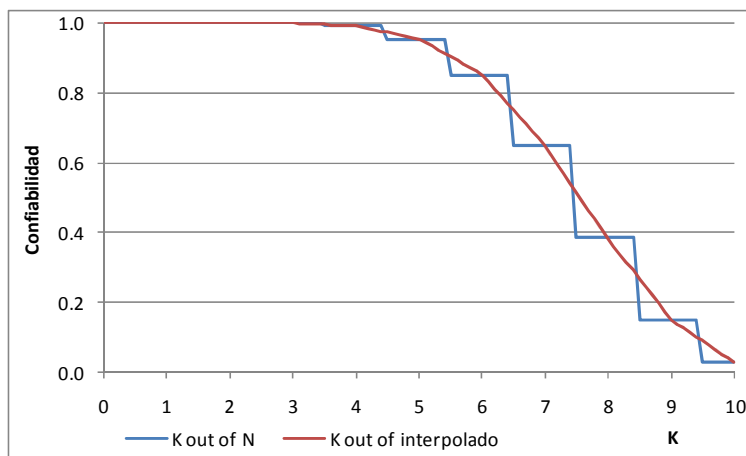


Figura 36. Confiabilidad en función del número necesario de componentes (K) con y sin interpolación.

Puede observarse, como se mencionó anteriormente, que al considerarse la posibilidad de valores no enteros para K, el redondeo de su valor impacta directamente en la confiabilidad del sistema. Por ejemplo, si K es igual a 7.6 la confiabilidad del sistema será 0.49 o 0.4 si se considera o no la interpolación propuesta, respectivamente.

3.8 Consideraciones sobre la estimación del número necesario de componentes en un sistema redundante

Se entiende por sistema redundante a la reunión de componentes del mismo tipo (no necesariamente iguales desde el punto de vista de su confiabilidad) en que el número total de componentes disponible excede el número de componentes necesario para cumplir el objetivo propuesto (un determinado tonelaje planificado).

En el modelo de confiabilidad propuesto en este trabajo, la conexión K out of N es utilizada en las siguientes componentes:

- Conexión de puntos de extracción para conformar cruzado de producción.
- Conexión de cruzados de producción (puntos de extracción, calles de producción y piques de traspaso) para conformar cruzados de transporte.
- Conexión entre cruzados de transporte para conformar la mina.

En este capítulo, sin importar el tipo de componente del que se trate, se denotará a un sistema redundante como K out of N, donde K es el número necesario de componentes y N es el número total de componentes disponibles.

Por redundancia total del sistema

En el modelo de confiabilidad propuesto, la forma genérica de calcular el número necesario de componentes K puede expresarse mediante:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^P}{\sum_{i=1}^N t_i^N} \cdot N$$

Donde:

- t_i^P es el tonelaje planificado de la componente i.
- t_i^N es el tonelaje nominal de la componente i.

El numerador de la expresión anterior cuantifica el tonelaje planificado del sistema completo (aquel conformado por la conexión de las N componentes respectivas), es decir es el tonelaje que debe alcanzarse para que el sistema cumpla su objetivo. Por su parte, considerando que el tonelaje nominal de una componente se entiende como el tonelaje máximo que una componente puede producir en el intervalo de tiempo planificado, el denominador de la expresión anterior cuantifica el tonelaje máximo que el sistema completo puede producir en ese lapso. La razón entre ambas cantidades cuantifica entonces la proporción en que el tonelaje nominal contiene al planificado (como sistema completo). Al multiplicar esta razón por el número total de componentes se obtiene consecuentemente el número de componentes con los cuales es posible alcanzar el tonelaje planificado.

Uno de los aspectos interesantes del formulismo anterior es que para el caso

$\sum_{i=1}^N t_i^P = \sum_{i=1}^N t_i^N$ se rescata el caso $K = N$ que corresponde a que en el sistema no exista redundancia alguna, es decir, las componentes están conectadas en serie (sistema N out of N). Por otro lado, la conexión en paralelo de las componentes, es decir $K=1$ (sistema 1 out of N), se cumple sólo si el tonelaje nominal del sistema completo excede N veces al planificado, es decir:

$$\sum_{i=1}^N t_i^P = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^N}{N}$$

Por redundancia de componentes

Una forma alternativa de calcular el número necesario de componentes en un sistema redundante puede expresarse mediante:

$$K = \sum_{i=1}^N \frac{t_i^P}{t_i^N}$$

En este caso, la razón entre el tonelaje planificado y el tonelaje nominal equivale al número de veces que el tonelaje planificado contiene al nominal para cada componente por separado, es decir, es una medida de la redundancia que aporta cada componente al

sistema, de manera individual. Cuando para cada componente se cumple que $t_i^P = t_i^N$, es decir, no hay redundancia en el sistema, se tiene que $K = N$ y con ello se tiene una conexión en serie de todas las componentes del sistema (N out of N).

Por productividad media

En el modelo de confiabilidad de Rubio (2006), que considera únicamente el nivel de producción, se postula que para la estimación del número necesario de componentes en un sistema redundante (particularmente para el caso de puntos de extracción en un mismo cruzado de producción) puede considerarse la siguiente fórmula:

$$k_i(t) = \max \left\{ \frac{T_i(t)}{d_i(t)}, k_i^c \right\}$$

Donde:

- $k_i(t)$ es el número mínimo de puntos de extracción necesarios en el cruzado de producción i , en el periodo t , para cumplir con el tonelaje $T_i(t)$.
- $T_i(t)$ es el tonelaje planificado para el cruzado de producción i en el periodo t .
- $d_i(t)$ es la productividad promedio de los puntos de extracción del cruzado i en el periodo t .
- k_i^c es el número mínimo de puntos de extracción necesarios para alcanzar un ciclo de tiraje dado para controlar la convergencia del cruzado de producción i .

Adicionalmente, en el modelo de confiabilidad de Rubio (2006) se presenta una manera de calcular el número necesario de cruzados de producción para cumplir con la producción del nivel de extracción en su totalidad. La metodología considerada es la siguiente:

- Ordenar los cruzados de producción en orden ascendente según su capacidad nominal.

- Sumar el tonelaje nominal de cada cruzado de producción (considerando el ordenamiento anterior) hasta alcanzar el tonelaje meta del nivel de extracción. Lo anterior determina el número de puntos de extracción necesarios.

3.9 Consideraciones sobre el cálculo del tonelaje nominal de componentes

El tonelaje nominal de una componente cualquiera no afecta en el cálculo de la confiabilidad de dicha componente, pues conocido el número de eventos, la confiabilidad se calcula directamente desde su PCC. Sin embargo, cuando se considera la conexión redundante de componentes, el tonelaje nominal adquiere singular importancia pues permite estimar el número necesario de componentes, con lo que tiene un impacto directo en la redundancia del sistema y con ello, en la confiabilidad del mismo.

En relación a lo anterior, es importante destacar el hecho que previo al cómputo del número necesario de componentes en un sistema conectado en K out of N es necesario realizar la siguiente actualización del tonelaje nominal:

$$t^N = \begin{cases} t^N & \text{si } t^N \geq t^P \\ t^P & \text{si } t^N \leq t^P \end{cases}$$

Si eventualmente el tonelaje nominal es menor que el tonelaje planificado, de no realizarse dicho cambio, al calcular el número necesario de componentes se obtiene $K > N$ y con ello la imposibilidad de resolver el sistema K out of N. Al realizarse dicho cambio, las componentes quedan conectadas en un sistema N out of N, que es equivalente a la conexión en serie de las componentes, debido a que no existe redundancia. Si se observa en detalle la actualización propuesta, puede notarse que ésta es efectiva si y sólo si el tonelaje planificado es mayor que el tonelaje nominal, lo que conceptualmente no puede ocurrir, sin embargo este parámetro no necesariamente es considerado al momento de realizar la programación de la producción.

Otro aspecto relevante del tonelaje nominal en el modelo de confiabilidad propuesto es el arrastre del mismo a medida que se agrupan componentes. Considérese a modo de ejemplo un cruzado de producción como el de la siguiente figura:

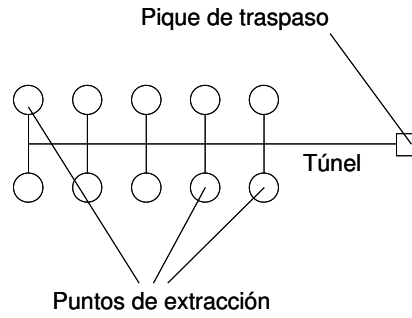


Figura 37. Esquema de conectividad de componentes en un cruzado de producción con pique de traspaso.

Asúmase conocida la confiabilidad $R_i^{DP}(t_i^{P(DP)})$ de cada punto de extracción, la confiabilidad $R_j^{PC}(t_j^{P(PC)})$ del túnel de producción y la confiabilidad $R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$ del pique de traspaso, como componentes individuales. Obviamente, por balance de masas, los tonelajes planificados de las componentes mencionadas cumplen con la siguiente relación:

$$t_s^{P(OP)} = t_j^{P(PC)} = \sum_{i=1}^I t_i^{P(DP)}$$

Supóngase además que el tonelaje nominal de cada punto de extracción está dado por $t_i^{N(DP)}$ (actualizados independientemente si $t_i^{N(DP)} < t_i^{P(DP)}$). Nótese que para calcular la confiabilidad del cruzado de producción completo, no se requiere el tonelaje nominal del túnel de producción ni del pique de traspaso. Entonces, para calcular la confiabilidad del cruzado de producción completo basta aplicar la fórmula:

$$R_j^{DP-PC-OP}(t_j^{P(DP-PC-OP)}) = \left\{ R_i^{DP}(t_i^P) \right\}_K^I \cdot R_j^{PC}(t_j^{P(PC)}) \cdot R_s^{OP}(t_s^{P(OP)})$$

Donde el tonelaje nominal de los puntos de extracción se utiliza únicamente para calcular la confiabilidad del sistema redundante de puntos de extracción (por confiabilidad total del sistema, según el modelo propuesto). Ahora, supóngase que el pique de traspaso del sistema anterior conecta con un túnel de transporte que también está alimentado por el

pique de traspaso de otro cruzado de producción de las mismas características que el anteriormente expuesto. La confiabilidad del cruzado de producción j está dada por $R_j^{DP-PC-OP}(t_j^{P(DP-PC-OP)})$. Entonces, el cruzado de transporte puede modelarse como la conexión redundante de cruzados de producción en serie con el túnel de transporte. Para determinar el tonelaje nominal de cada cruzado de producción debe tenerse en cuenta que cada uno de ellos está compuesto por tres tipos de componentes: conexión redundante de puntos de extracción, túnel de producción y pique de traspaso, por lo que el tonelaje nominal del cruzado de producción está dado por:

$$t_j^{N(DP-PC-OP)} = \min \left\{ \sum_{i=1}^I t_i^{N(DP)}, t_j^{N(PC)}, t_s^{N(OP)} \right\}$$

Donde si es necesario conocer las capacidades nominales de los puntos de extracción, el túnel de producción y el pique de traspaso, dado que, por ejemplo, aunque los puntos de extracción puedan ingresar nominalmente 200,000 t/mes como conjunto al sistema, si la productividad nominal del túnel de producción es igual a la del pique de traspaso e igual a 160,000 t/mes, sólo es posible extraer del cruzado de producción (a la salida del pique de traspaso) un máximo de 160,000 t/mes. Obviamente, cualquiera sea la componente limitante, la productividad a la salida del pique de traspaso estará limitada a la capacidad nominal de dicha componente.

4 Estudio de caso: Mina DOZ-ESZ, PT Freeport Indonesia

La compañía minera Freeport McMoRan Cooper & Gold Incorporated es dueña del 90.64% de PT Freeport Indonesia, el principal operador y subsidiario del complejo minero Grasberg, del cual DOZ (Deep Ore Zone) y ESZ (Erstberg Stockwork Zone) forman parte. El restante 9.36% pertenece al Gobierno de Indonesia. El complejo minero Grasberg se encuentra ubicado en la isla de Papua, Indonesia, según lo muestra la siguiente figura:

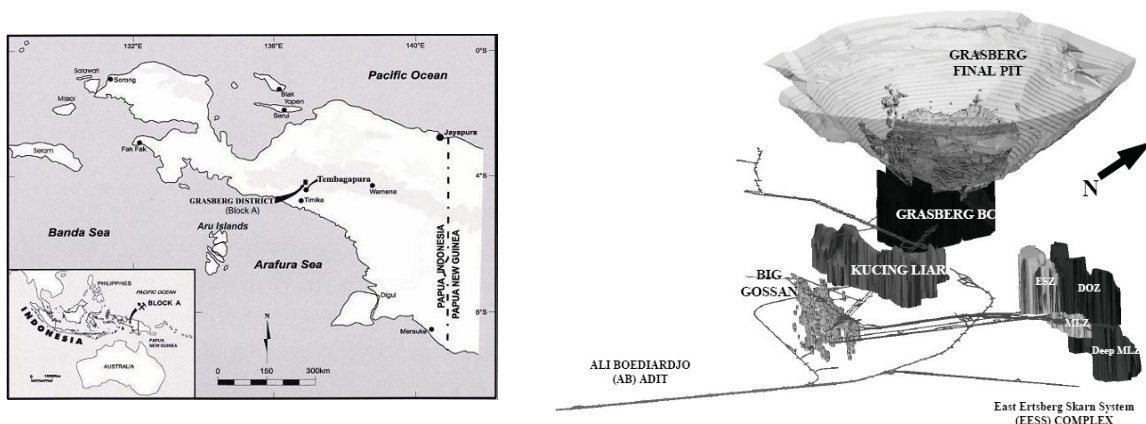


Figura 38. Izquierda: ubicación de la mina en estudio. Derecha: disposición general de los sectores productivos en el complejo minero Grasberg (Casten et Al, 2008).

Actualmente, las operaciones del complejo minero Grasberg producen un total de 240,000 toneladas por día, de las cuales un 75% proviene del rajo abierto Grasberg y el 25% restante de DOZ. El fin de las operaciones del rajo está planificado para el 2015, año en el cual la producción total del complejo se compone además de una serie de minas subterráneas explotadas principalmente por métodos de hundimiento, que para el año 2022 sustentan una producción total de 240,000 toneladas por día. Según muestra el siguiente programa de producción (Casten et Al, 2008):

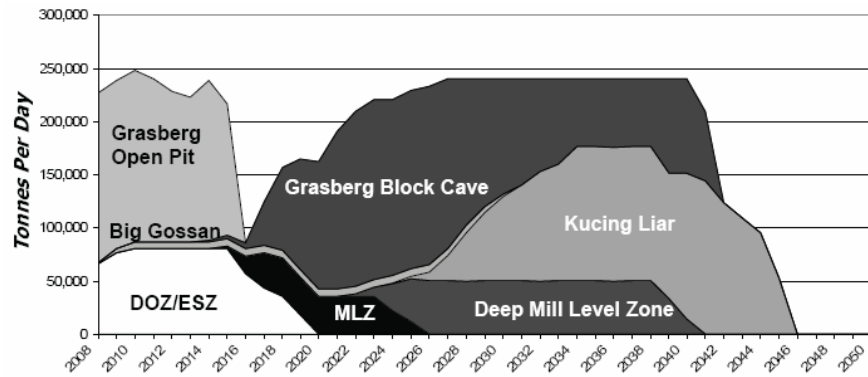


Figura 39. Programa de producción del complejo minero Grasberg 2008-2045 (Casten et Al, 2008).

4.1 Descripción del sistema minero

Nivel de producción

El nivel de producción de los sectores DOZ y ESZ se encuentran contiguos aproximadamente en la cota 3,150m. La siguiente figura muestra en planta el nivel de producción de la mina en estudio:

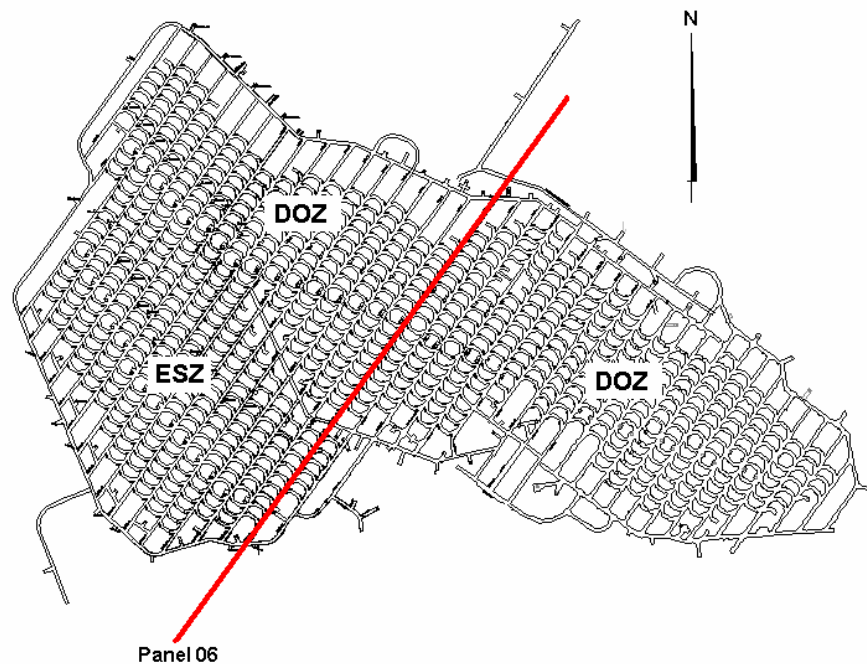


Figura 40. Nivel de producción DOZ-ESZ.

La característica principal del nivel de producción a considerarse en el modelo de confiabilidad es que desde el panel 6 hacia el NW, las calles de producción cuentan con 2 piques de traspaso. Consecuentemente, desde el panel 5 hacia en SW las calles de producción poseen un único pique de traspaso. Este hecho es relevante para el cálculo de la confiabilidad dado que el tonelaje ingresado al sistema por un cruzado de producción con 2 piques de traspaso puede distribuir este tonelaje en dichas componentes, entregando flexibilidad al sistema y eventualmente una mayor capacidad productiva que en el caso en que existe un único pique de traspaso por cruzado de producción, donde toda la producción debe extraerse por el único pique disponible.

Nivel de transporte

El nivel de transporte se sitúa aproximadamente en la cota 3076m y se conecta con el nivel de producción a través de piques de traspaso. La siguiente figura muestra en planta el nivel de transporte de la mina en estudio:

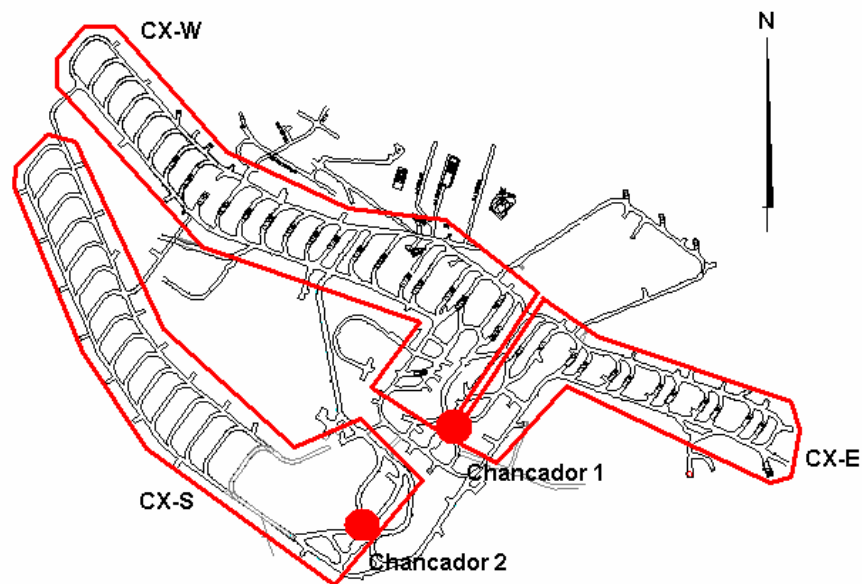


Figura 41. Cruzados de transporte considerados en el nivel de transporte.

Para implementar el modelo de confiabilidad se consideran entonces 3 cruizados de transporte independientes, denominados CX-E, CX-W y CX-S; conectados a 2 chancadores.

4.2 Modelo de confiabilidad

Relaciones jerárquicas

El primer paso en la configuración del modelo de confiabilidad es definir las relaciones jerárquicas que gobernarán el mismo, es decir, debe especificarse como se relacionan todas las componentes del modelo mediante los diferentes tipos de conexión disponibles. Dichas relaciones de conectividad están dictadas por el diseño minero del sistema. El siguiente diagrama resume esquemáticamente como se conectaron las componentes para representar el sistema minero analizado:

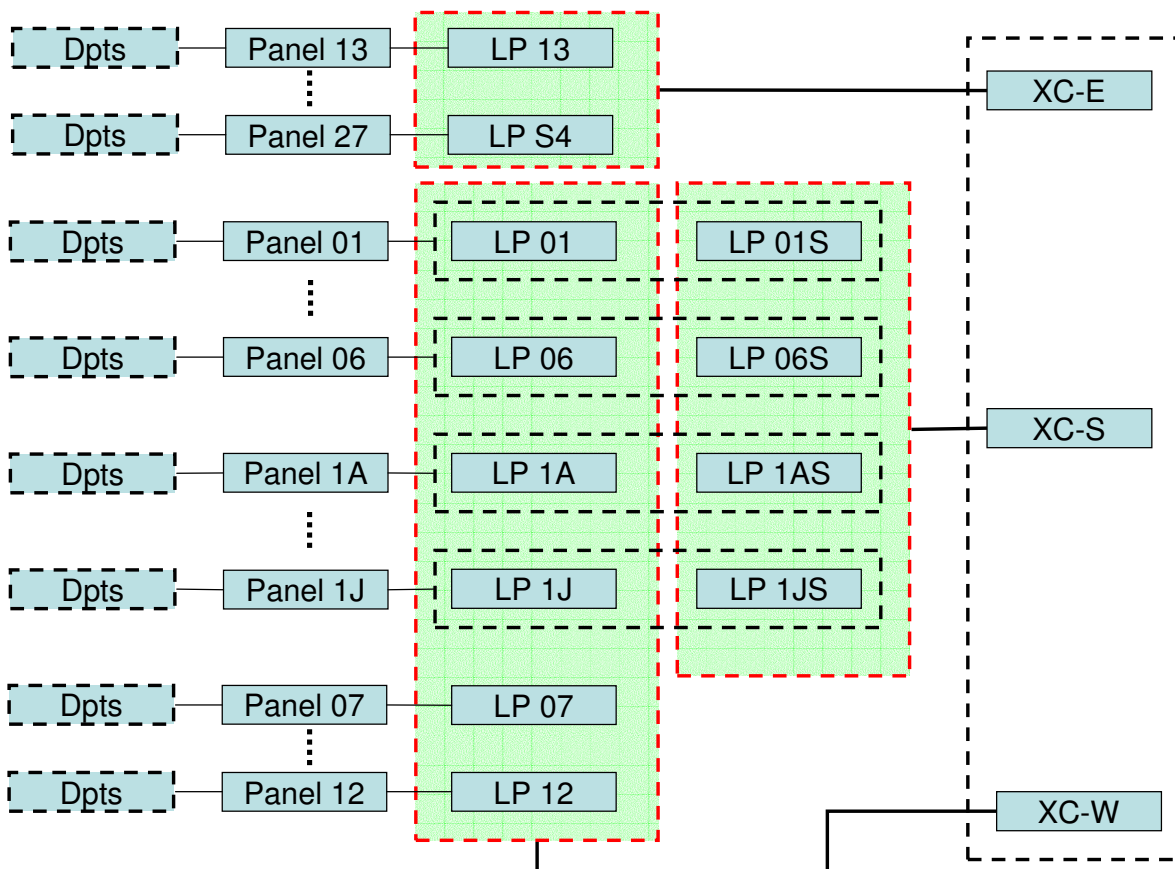


Figura 42. Diagrama de bloques de conexión de componentes para el cálculo de confiabilidad del programa de producción.

En el diagrama anterior, la línea punteada esquematiza la conexión K out of N entre componentes y la línea continua una conexión en serie. Según lo anterior, los puntos de extracción asociados a un panel en particular se encuentran conectados en K out of N

entre sí. Este subsistema está conectado a su vez en serie con el cruzado de producción asociado. Por su parte, el subsistema conformado por puntos de extracción y paneles se encuentra conectado en serie con la conexión K out of N entre piques del mismo panel. En el nivel de transporte, los piques de traspaso asociados a un mismo cruzado de transporte se conectan en K out of N entre sí, subsistema que se conecta en serie con el túnel de transporte. Finalmente, los cruzados de transporte se conectan en K out of N para conformar la mina.

Por otro lado, es importante considerar que si bien las relaciones presentadas no dependen del tiempo, la infraestructura disponible es variable en cada periodo y viene dada por el programa de preparaciones de la mina en estudio. La infraestructura total considerada es la siguiente:

Componente	Nº Total
Puntos de extracción	1,332
Cruzados de producción (paneles)	37
Piques de traspaso	53
Cruzados de transporte	3

Tabla 2. Total de componentes consideradas en el modelo de confiabilidad.

Supuestos específicos

Para simplificar las conexiones entre componentes del modelo, los paneles 25, 26 y 27 son considerados como un único panel cuyo pique de traspaso asociado es el denominado LP04S, que se conecta al cruzado de transporte CX-E. El número total de puntos de extracción asociados a este panel virtual (denominado panel 252627) es 27. La siguiente figura muestra la disposición espacial de la infraestructura asociada:

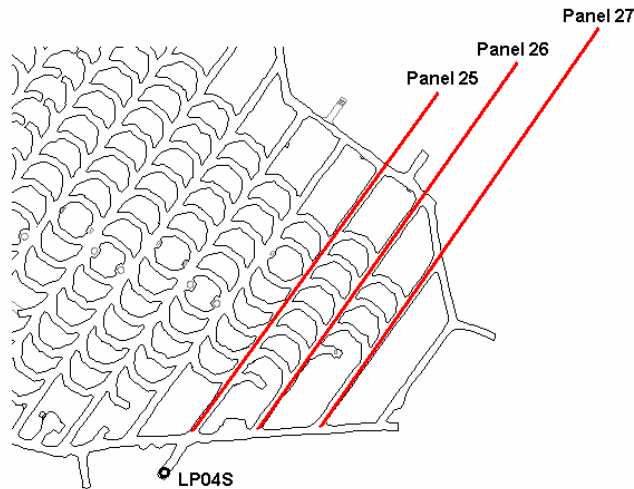


Figura 43. Nivel de producción en detalle para los paneles 25, 26 y 27.

Por otro lado, los piques de traspaso LPN1, LPN2 y LPN3 no fueron considerados en el modelo de confiabilidad debido a:

- LPN1 movilizó sólo 1,970 t/mes en promedio durante el año 2006.
- LPN2 y LPN3 no fueron utilizados durante el año 2006.

La siguiente figura muestra la disposición espacial de la infraestructura involucrada:

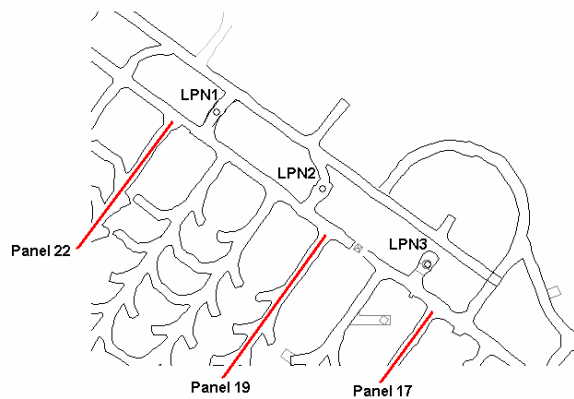


Figura 44. Nivel de producción en detalle para los piques de traspaso LPN1, LPN2 y LPN3.

Es importante señalar que eventualmente estos piques de traspaso podrían entregar redundancia extra al sistema, especialmente a los paneles más cercanos, que los resultados del modelo de confiabilidad no reflejarán.

4.3 Construcción de parámetros de entrada para el modelo de confiabilidad

Curvas U

Una curva U muestra la relación entre la frecuencia de ocurrencia de eventos y la madurez, medida en toneladas extraídas, de una componente minera en particular (puntos de extracción, piques de traspaso, etc.).

Para la construcción de la curva U de los puntos de extracción se consideraron únicamente los eventos de colgaduras y sobretamaños registrados entre los periodos 2000 – 2006 y la información histórica productiva durante el mismo lapso. La base de datos con el estado de los puntos de extracción disponible presenta el siguiente formato:

Punto de extracción	Codificación	Fecha (dd/mm/aaaa)	Es evento
P25-01E	A	16/02/2004	1
P25-01W	A	16/02/2004	1
P25-02E	A	16/02/2004	1
P25-02W	A	16/02/2004	1
P25-03E	A	16/02/2004	1
P25-03W	A	16/02/2004	1
P25-04E	A	16/02/2004	1
P25-04W	A	16/02/2004	1
P25-05W	A	16/02/2004	1
P26-01W	A	16/02/2004	1
P26-02W	A	16/02/2004	1
P26-03W	A	16/02/2004	1
P26-04W	A	16/02/2004	1
P13-05W	A/T	16/02/2004	0
P15-01W	B	16/02/2004	0

Nº Puntos de extracción	1,513
Número de registros	596,948
Número de eventos	368,698
Fecha inicio	01/04/2001
Fecha término	31/12/2006

Tabla 3. Izquierda: fragmento de la base de datos de estados históricos de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.

La base de datos anterior especifica día a día el estado de los puntos de extracción durante el periodo mencionado. Dicho estado se especifica en el campo “Codificación” y describen en general el estado del material presente en cada punto de extracción, que puede ser o no una colgadura o sobretamaño. Así, el campo “es Evento” discrimina

aquellos registros que son considerados como interferencias operacionales. Por su parte, la base de datos con la información de extracción histórica por punto de extracción presenta el siguiente formato:

Punto de extracción	Fecha (mm/aaaa)	Tonelaje (t/mes)
P20-12W	11/2006	3,962
P20-12W	12/2006	3,237
P20-12W	01/2007	3,960
P20-12W	02/2007	3,271
P20-12W	03/2007	4,319
P20-12W	03/2007	3,410
P20-12W	04/2007	3,941
P20-12W	05/2007	5,954
P20-13E	07/2004	5,935
P20-13E	08/2004	8,421
P20-13E	09/2004	4,099
P20-13E	10/2004	4,315
P20-13E	11/2004	6,677
P20-13E	12/2004	7,500
P20-13E	01/2005	6,822

Nº Puntos de extracción	481
Registros	13,933
Mínimo (t/mes)	1
Máximo (t/mes)	44,160
Media (t/mes)	4,954
Desv. Est (t/mes)	2,393
Fecha inicio (mm/aaaa)	11/2000
Fecha término (mm/aaaa)	12/2006

Tabla 4. Izquierda: fragmento de la base de datos de extracción histórica de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.

La curva U resultante de la información antes descrita se muestra a continuación:

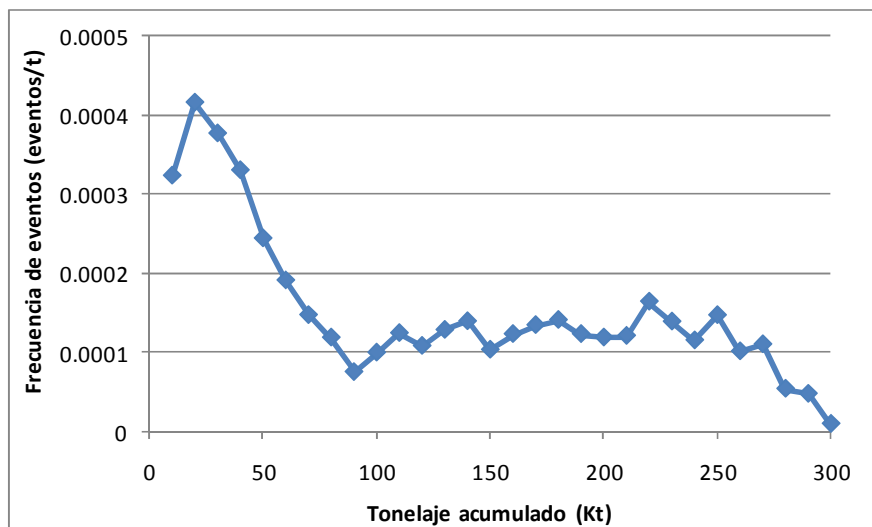


Figura 45. Curva U de puntos de extracción actual (2000-2006).

Puede observarse que la curva U de los puntos de extracción presenta un periodo de fallas tempranas hasta las 90,000 toneladas aproximadamente, donde la frecuencia de eventos se estabiliza en alrededor de 1×10^{-4} eventos por tonelada. En este sentido, dado el tipo de eventos considerado en la construcción de la curva anterior, debe entenderse que la frecuencia de eventos no corresponde únicamente a una propiedad del punto de extracción propiamente tal, si no además del material que fluye a través de él, pues la frecuencia de colgaduras está directamente relacionada con la granulometría del material que pasa a través de dicha componente.

Para la construcción de las curvas U de los piques de traspaso, se consideró únicamente la información operacional histórica del periodo 2006 y los eventos de interrupción listados a continuación:

- Colgaduras.
- Reparaciones mecánicas buzón.
- Reparación de parrilla.

La información disponible relativa al estado operativo de los piques de traspaso se compone de numerosas planillas que especifican a intervalos de 1 hora, el estado operacional de los piques de traspaso, en un formato similar al de la siguiente figura:

	Period	LP#8	LP#9	LP#10	LP#12	LP #13
I	08:00-09:00	OK	OK	OK	OK	OK
	09:00-10:00	OK	OK	OK	OK	OK
	10:00-11:00	OK	OK	OK	OK	OK
	11:00-12:00	OK	OK	OK	OK	OK
	12:00-13:00	OK	OK	OK	OK	OK
	13:00-14:00	OK	OK	OK	OK	OK
	14:00-15:00	OK	OK	OK	OK	OK
	15:00-16:00	OK	OK	OK	OK	OK

Figura 46. Fragmento de base de datos original de estado de piques de traspaso.

La información anterior fue reestructurada de tal forma de contar con una base de datos con el siguiente formato:

Pique de traspaso	Fecha (mm/aaaa)	Eventos (eventos/mes)
LP05	01/2006	0
LP05	02/2006	0
LP05	03/2006	0
LP05	04/2006	0
LP05	05/2006	0
LP05	06/2006	0
LP05	07/2006	0
LP05	08/2006	4
LP05	09/2006	2
LP05	10/2006	1
LP05	11/2006	2
LP05	12/2006	0
LP06	01/2006	0
LP06	02/2006	0
LP06	03/2006	0

Nº piques de traspaso	16
Registros	192
Mínimo (eventos/mes)	0
Máximo (eventos/mes)	33
Media (eventos/mes)	5.1
Desv. Est (eventos/mes)	6.6
Fecha inicio (mm/aaaa)	01/2006
Fecha término (mm/aaaa)	12/2006

Tabla 5. Izquierda: fragmento de la base de datos de estados históricos de piques de traspaso. Derecha: estadísticas básicas.

Por su parte, la información de extracción histórica de los piques de traspaso, desde el nivel de transporte, en el mismo periodo de análisis fue obtenida de la base de datos del sistema Dispatch, obteniéndose, luego de la reestructuración de formato, una base de datos del tipo:

Pique de traspaso	Fecha (mm/aaaa)	Tonelaje (t/mes)
LP05	01/2006	0
LP05	02/2006	0
LP05	03/2006	0
LP05	04/2006	0
LP05	05/2006	0
LP05	06/2006	0
LP05	07/2006	0
LP05	08/2006	3,588
LP05	09/2006	16,744
LP05	10/2006	16,790
LP05	11/2006	17,526
LP05	12/2006	15,732
LP06	01/2006	0
LP06	02/2006	0
LP06	03/2006	0

Nº piques de traspaso	16
Registros	192
Mínimo (t/mes)	0
Máximo (t/mes)	172,500
Media (t/mes)	78,473
Desv. Est (t/mes)	40,583
Fecha inicio (mm/aaaa)	01/2006
Fecha término (mm/aaaa)	12/2006

Tabla 6. Izquierda: fragmento de la base de datos de extracción histórica de puntos de extracción. Derecha: estadísticas básicas.

La curva U para piques de traspaso resultante se muestra a continuación:

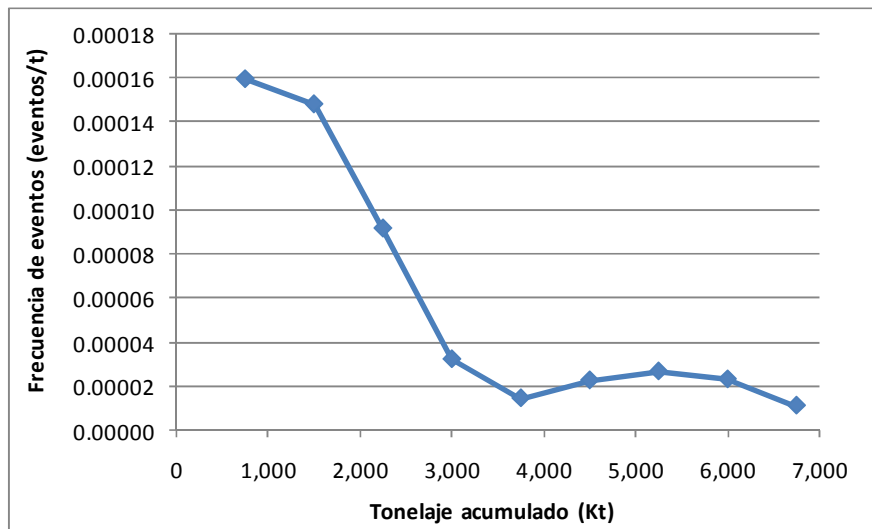


Figura 47. Curva U de piques de traspasos actual (2006).

Puede apreciarse que la curva anterior presenta únicamente las etapas de fallas tempranas y vida útil. Se observa entonces que durante los inicios de la vida productiva

de un pique de traspaso, la frecuencia de eventos es elevada y disminuye progresivamente hasta estabilizarse, a partir de los 3.5 millones de toneladas extraídas, en el valor medio de 2×10^{-5} eventos por tonelada. La disminución de la frecuencia de eventos puede atribuirse, al menos, al desgaste progresivo que sufre el pique de traspaso a medida que se utiliza, pues este desgaste tiende a aumentar el diámetro de la componente y con ello a disminuir la probabilidad de ocurrencia de colgaduras. Relacionado a lo anterior, al igual que en el caso de los puntos de extracción, la frecuencia de eventos no sólo está relacionada con el pique propiamente tal, sino además con las características constitutivas del material que fluye a través de él.

Es relevante mencionar el hecho que si bien en este estudio se consideró que todos los puntos de extracción y piques de traspaso poseen una curva U única, la tendencia a la ocurrencia de eventos de componentes del mismo tipo, situadas en sectores diferentes del sistema minero pueden ser diferentes, más aún todas las componentes de un mismo tipo podrían presentar una U diferente, debido a que las condiciones del macizo rocoso son cambiantes en el espacio. Sin embargo, para componentes localizadas suficientemente cerca, podría esperarse un comportamiento similar.

Curvas de producción característica

La curva de producción característica describe la productividad (en toneladas por unidad de tiempo) de una componente minera en particular en función del número de eventos en un lapso determinado.

Para la construcción de la curva PCC de los puntos de extracción se consideró la información operacional histórica entre los periodos 2000 – 2006 y los mismos tipos de eventos considerados para la construcción de la curva U de los puntos de extracción. La curva de producción característica obtenida se muestra en el siguiente gráfico:

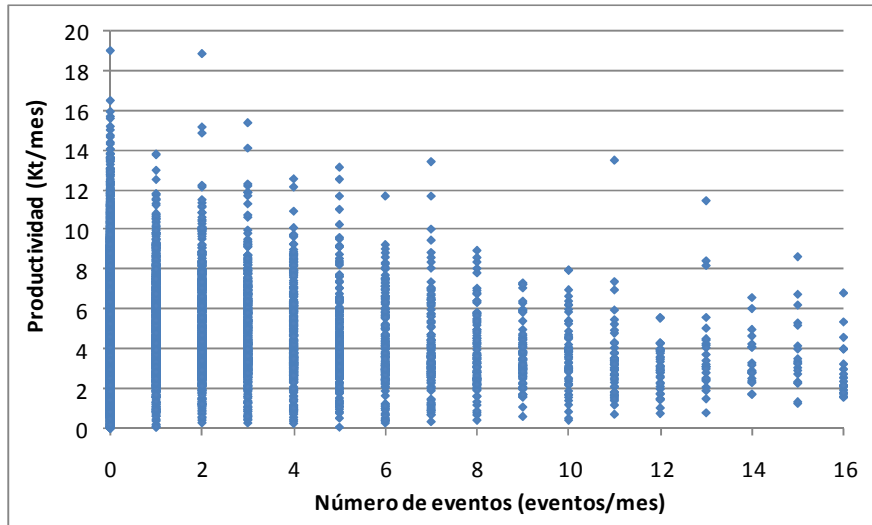


Figura 48. Curva de producción característica de puntos de extracción actual (2000-2006), todos los registros.

Puede observarse en la curva anterior que la productividad límite del punto de extracción tiende a disminuir conforme aumenta el número de eventos. Lo anterior es consecuente con el hecho que dado que el tiempo total es fijo (1 mes), cuando existe un mayor número de eventos la componente debe pasar una mayor parte de este tiempo en reparaciones, lo que disminuye el tiempo efectivo en producción y consecuentemente la productividad. Adicionalmente, dado que la curva anterior se construyó con información operacional histórica, algunos de los registros de productividad están limitados no por las capacidades de la componente si no por el programa de producción que los generó. Lo anterior se traduce en que la distribución de valores de productividad para un número de eventos dado tenga una productividad media menor, lo que impacta directamente en el cálculo de la confiabilidad de la componente, viéndose ésta reducida por la existencia de valores de productividad que no reflejan las capacidades máximas del sistema. Para reducir este efecto, la curva anterior fue filtrada de tal manera de eliminar todos aquellos registros de productividad que se encuentran en el 80% inferior de la distribución de valores asociada a cada número de eventos. El resultado se muestra en la Figura 49:

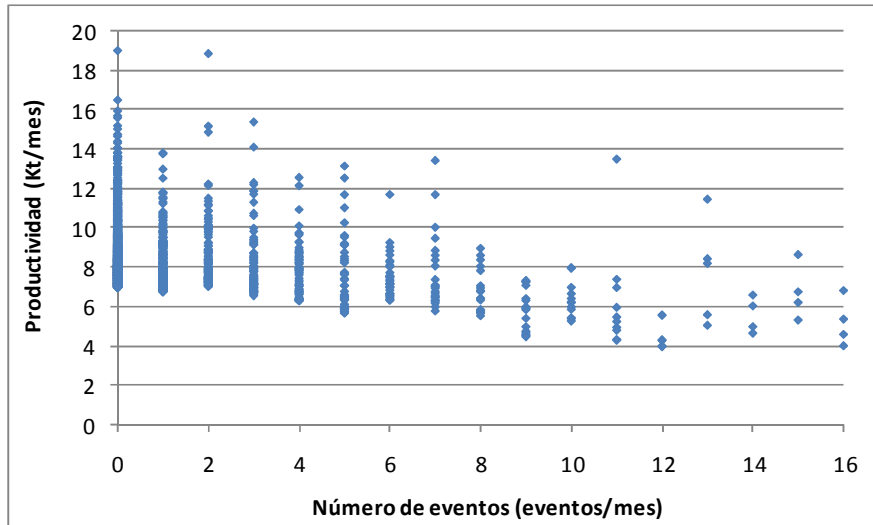
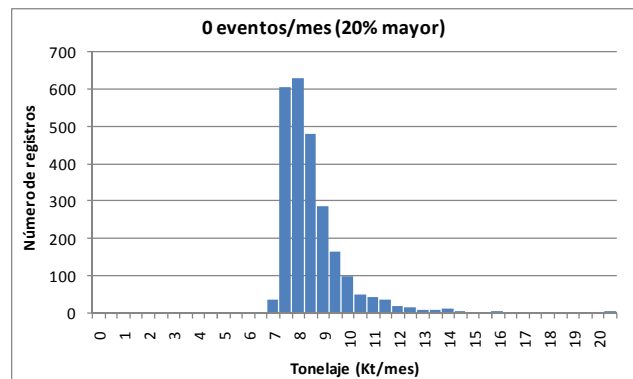
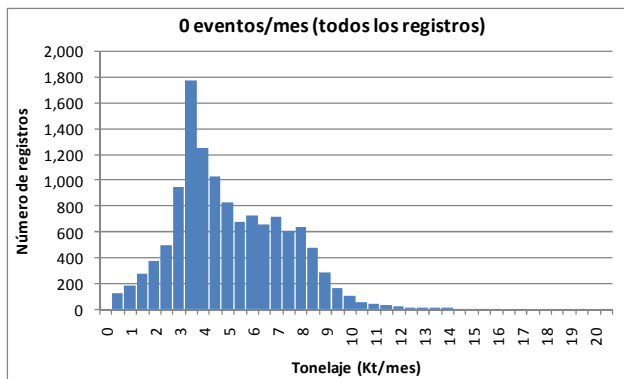


Figura 49. Curva de producción característica de puntos de extracción actual (2000-2006), registros sobre el percentil 80%.

Naturalmente, puede observarse que la tendencia observada en la curva anterior se mantiene, es decir, la productividad de los puntos de extracción tiende a disminuir conforme aumenta el número de eventos. Para ejemplificar el efecto de la aplicación de este filtro, los siguientes histogramas muestran la distribución de valores de productividad cuando el número de eventos por mes registrados es cero:



Número de registros	#	12,480
Mínimo	Kt/mes	1
Máximo	Kt/mes	44,160
Media	Kt/mes	4,867
Desv. Estándar	Kt/mes	2,330

Número de registros	#	2,496
Mínimo	Kt/mes	6,978
Máximo	Kt/mes	44,160
Media	Kt/mes	8,341
Desv. Estándar	Kt/mes	1,577

Figura 50. Izquierda: Histograma de valores de productividad de puntos de extracción para 0 eventos por mes, todos los registros. Derecha: registros sobre el percentil 80%.

Para la construcción de la curva de producción característica del túnel de producción se consideró la información operacional entre los periodos 2000 – 2006. En su construcción se consideró una estrategia de cierre fija e igual al 100% de los puntos activos de la calle en el periodo pertinente, es decir, la calle se cierra para su reparación cuando todos los puntos de extracción están detenidos por eventos de interferencia. La curva PCC obtenida es la siguiente:

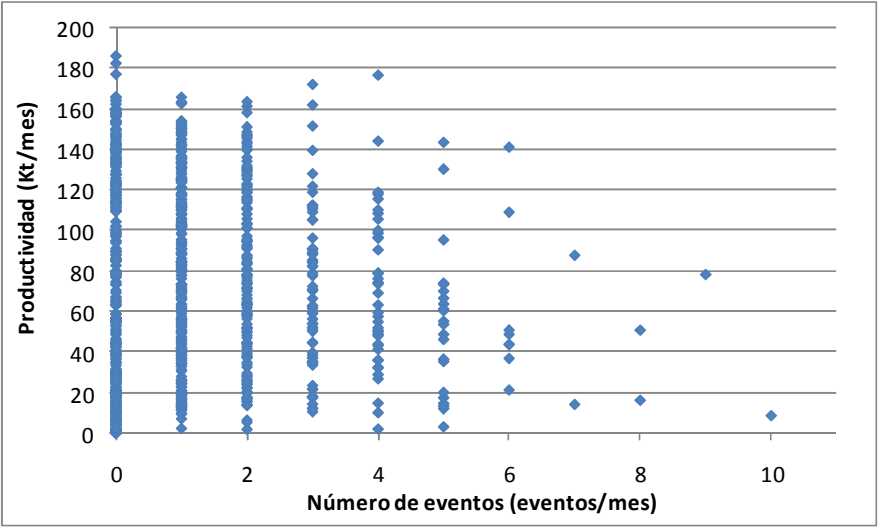


Figura 51. Curva de producción característica de cruzados de producción actual (2000-2006), todos los registros.

Se observa que la productividad límite tiende a disminuir conforme aumenta el número de eventos registrados por periodo, sin embargo, al igual que en los puntos de extracción, dado que la curva anterior se construyó con información operacional histórica, algunos de los registros de productividad están limitados no por las capacidades de la componente si no por el programa de producción que los generó. Si se consideran ahora los registros de productividad que se encuentran en el 10% mayor de la distribución de productividad para cada número de eventos, la curva de producción característica queda de la siguiente forma:

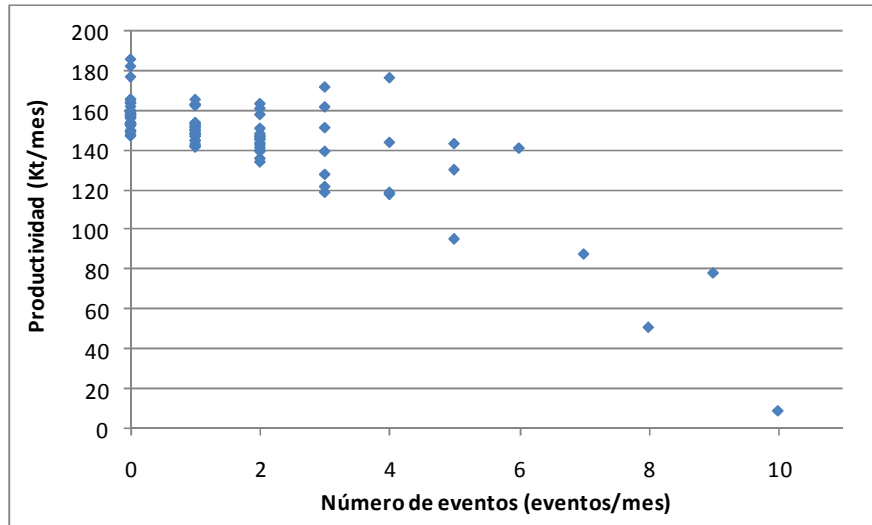
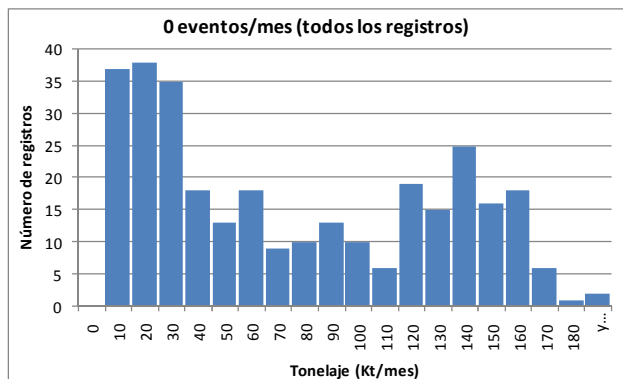
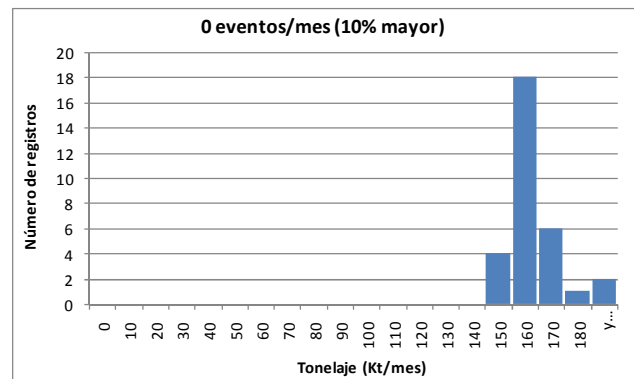


Figura 52. Curva de producción característica de cruzados de producción actual (2000-2006), registros sobre el percentil 80%.

Puede observarse que la tendencia a la disminución de la productividad conforme aumenta el número de eventos se mantiene. A modo de ejemplo, los siguientes histogramas muestran como cambia la distribución de valores de productividad para 0 eventos al considerar el filtro mencionado anteriormente:



Número de registros	#	309
Mínimo	Kt/mes	10
Máximo	Kt/mes	186,021
Media	Kt/mes	71,120
Desv. Estándar	Kt/mes	54,103



Número de registros	#	31
Mínimo	Kt/mes	147,369
Máximo	Kt/mes	186,021
Media	Kt/mes	158,876
Desv. Estándar	Kt/mes	9,179

Figura 53. Izquierda: Histograma de valores de productividad de cruzados de producción para 0 eventos por mes, todos los registros. Derecha: registros sobre el percentil 90%.

La información considerada para la construcción de la curva PCC de los piques de traspaso corresponde a la información histórica operacional del periodo 2006, los tipos de eventos considerados son los mismos que aquéllos considerados para la construcción de la curva U de este tipo de componente. La curva de producción característica obtenida para los piques de traspaso es la siguiente:

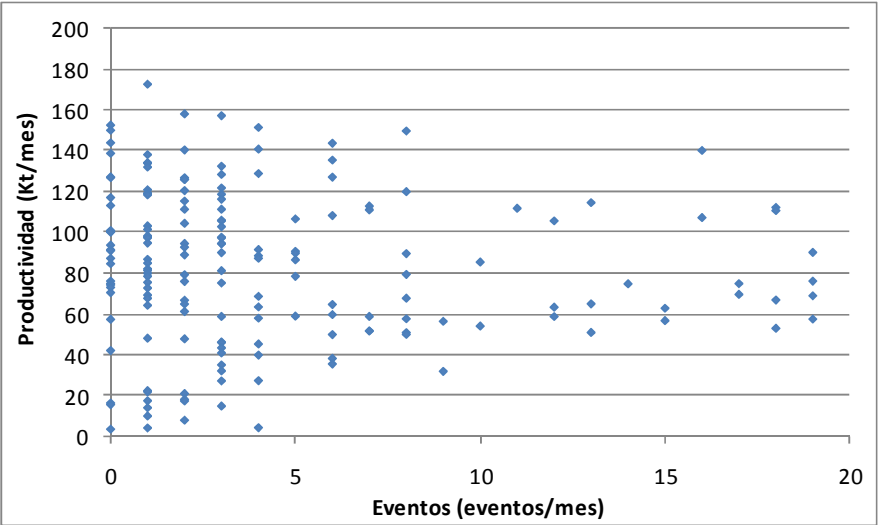


Figura 54. Curva de producción característica de piques de traspaso actual (2006), todos los registros.

Puede observarse que para los piques de traspaso, al considerar todos los registros de productividad, la tendencia a la disminución de la productividad con el aumento del número de eventos no es clara, sin embargo, si análogamente a lo realizado en las componentes estudiadas con anterioridad, se consideran únicamente, para cada número de eventos, los registros de productividad ubicados en el 60% superior de la distribución, la curva PCC para los piques de traspaso es la siguiente:

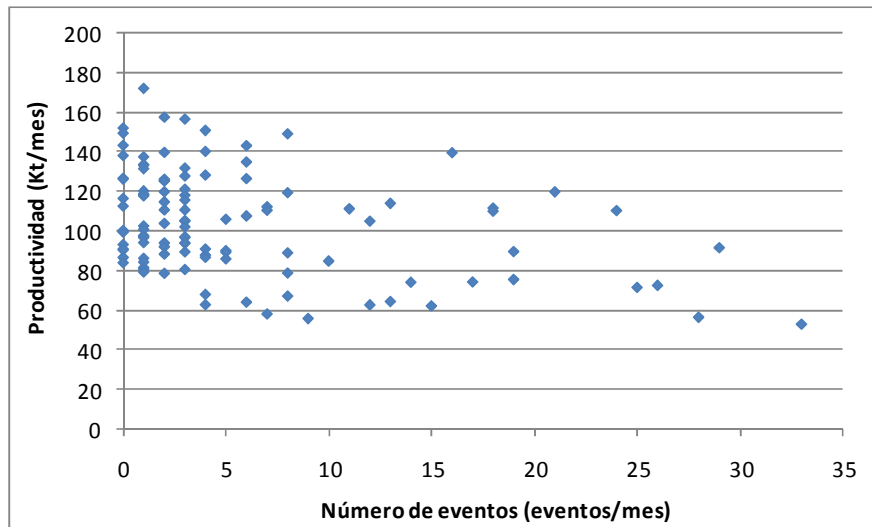


Figura 55. Curva de producción característica de piques de traspaso actual (2006), registros sobre el percentil 40%.

Puede observarse que con la aplicación del filtro antes mencionado se observa que la productividad de los piques de traspaso tiende a disminuir conforme aumenta el número de eventos, lo que refleja de mejor forma el hecho que el tiempo invertido en reparaciones corresponde a una mayor proporción del tiempo total conforme aumenta el número de eventos.

Si se observa la disposición espacial de los piques de traspaso en el nivel de transporte puede observarse que cuando es necesario intervenir un pique desde el nivel de transporte para su reparación, su detención no afecta la producción de los demás piques en el mismo cruzado de transporte, dado que cada pique de traspaso se encuentra en un túnel independiente de los demás. Por lo anterior, el concepto inicial de curva de producción característica (para un cruzado de transporte) debió ser modificado con objeto de adaptar el modelo de confiabilidad propuesto a la realidad de la mina en estudio. La modificación consistió en modelar la productividad mensual de un cruzado de transporte en función del número total de piques activos en cada cruzado en lugar del número total de eventos ocurridos en el mismo (debe tenerse en cuenta en este aspecto que el modelo de confiabilidad original consideraba que los eventos en un cruzado de transporte se generaban por la necesidad de reparación de piques de traspaso). De la misma forma que la curva de producción característica original, la curva de producción característica modificada considera el hecho que para un determinado número de piques de traspaso

activos en un cruzado la productividad del mismo no es fija, es decir, existe una dispersión de valores de productividad posibles, por lo que el cálculo de la confiabilidad del cruzado de transporte es similar con ambas curvas. Al considerar las relaciones de conectividad existentes en el periodo 2006 entre piques de traspaso y cruzados de transporte, la escasa información disponible permite generar la siguiente curva de producción característica:

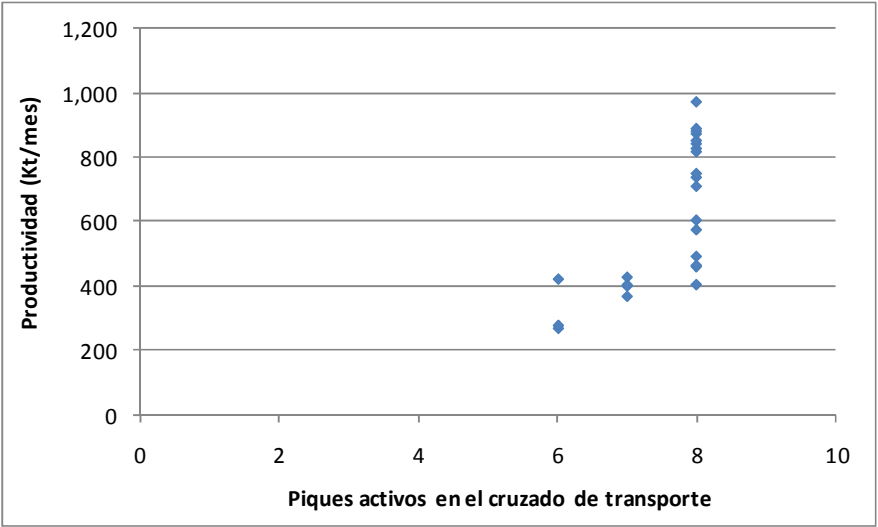


Figura 56. Curva de producción característica de cruzados de transporte actual modificada, todos los registros.

Naturalmente, la escasa información disponible dificulta la modelación de una curva de producción característica para el modelo de confiabilidad y de la misma manera que cualquier registro operacional histórico, puede que los valores de productividad estén limitados por el plan que los generó y no necesariamente por las capacidades productivas de la componente, sin embargo, la aplicación de filtros para intentar retirar este tipo de registros, como lo realizado en otras componentes, no es factible por el número reducido de datos. Se propone la siguiente curva de producción característica para los túneles de transporte, que considera los registros históricos para 8 piques de traspaso por cruzado:

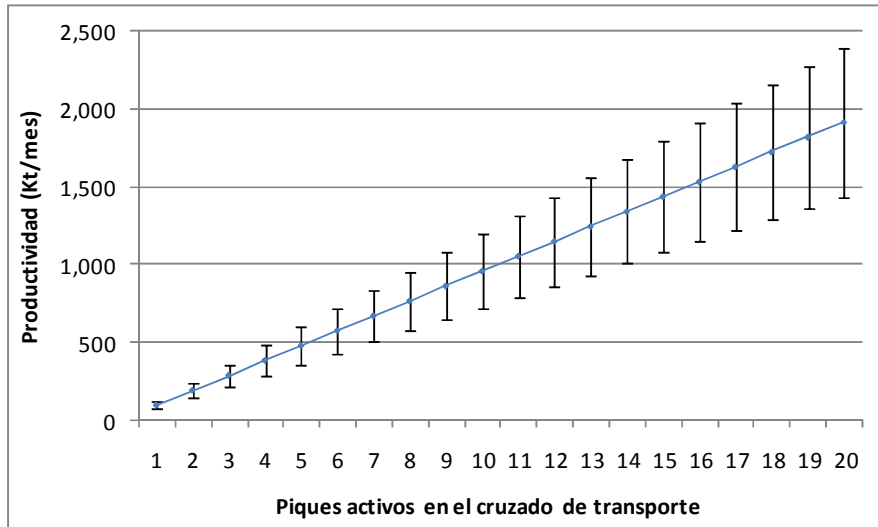


Figura 57. Curva de producción característica considerada para los túneles de transporte.

Para cada número de piques, la curva anterior considera una distribución normal cuya media y desviación estándar están dadas por las siguientes relaciones:

$$\mu(N) = 95,383 \cdot N$$

$$\sigma(N) = 7,500 \cdot N$$

Donde:

- $\mu(N)$: productividad media de la distribución de productividad para un total de N piques de traspaso.
- $\sigma(N)$: desviación estándar de la distribución de productividad para un total de N piques de traspaso.
- N : Piques de traspaso activos en el cruzado.

Las relaciones anteriores se basan en la regresión lineal de la media y desviación estándar (por separado), de los valores históricos de productividad para 8 piques de traspaso por cruzado de transporte (Figura 56) y asumiendo que para $\mu(N=0)=0$ y $\sigma(N=0)=0$.

De cualquier forma, es relevante mencionar que cualquier decisión sobre la modelación de las curvas de producción característica de cualquier componente como las realizadas (filtraje e interpolación de información) tienen un impacto directo en el resultado de confiabilidad de cada componente, y por ende en la confiabilidad de cada periodo del programa.

4.4 Validación del modelo de confiabilidad

Puntos de extracción

Con los registros de productividad histórica de los puntos de extracción y su respectiva distribución es posible calcular el porcentaje de valores de productividad que son mayores o iguales a un tonelaje dado, este valor se denomina confiabilidad histórica de la componente. La distribución acumulada inversa de los valores de productividad históricos de los puntos de extracción, que permite calcular la confiabilidad histórica para un tonelaje dado, se muestra a continuación:

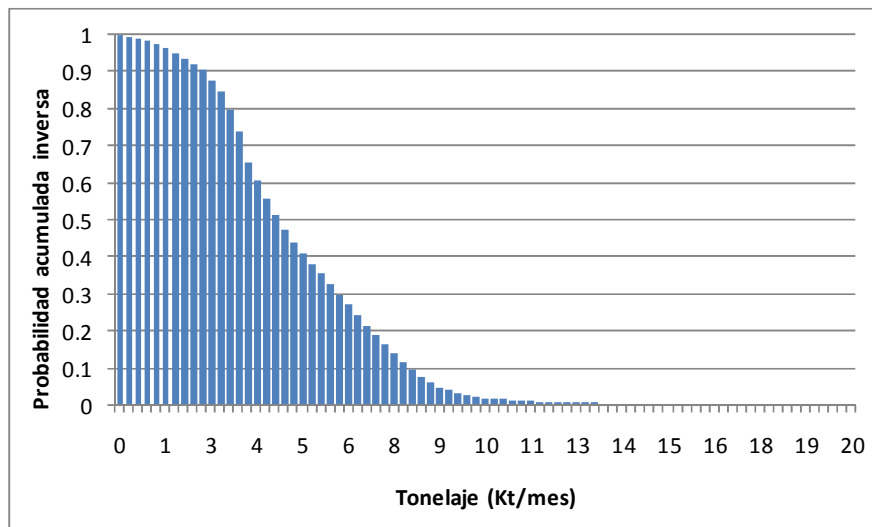


Figura 58. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de puntos de extracción.

La distribución anterior considera todos los registros productivos históricos de los puntos de extracción entre los años 2000 y 2006. Al considerar dichos registros para la construcción de la curva de producción característica de los puntos de extracción, la dispersión entre la confiabilidad histórica, así entendida, y los valores de confiabilidad calculados por el modelo son los siguientes:

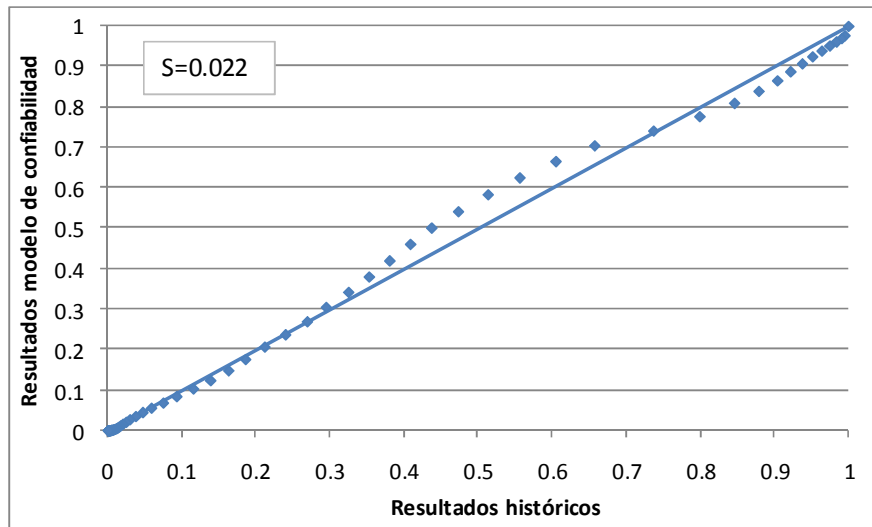


Figura 59. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para puntos de extracción (todos los registros).

El valor de S mostrado en la figura anterior permite calcular la dispersión entre los registros y la función identidad, y es calculado según la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x}_i)^2}{n-2}}$$

Donde:

- n es la cantidad de datos.
- x_i es la abscisa de la observación i .
- \tilde{x}_i es la ordenada y de la observación i .

El indicador $S=0.022$ muestra que el ajuste del modelo es aceptable, sin embargo, debe considerarse que la distribución de valores de la Figura 58 considera también aquellos registros cuyo valor está acotado por el tonelaje planificado del programa de producción que los generó. Es decir, si bien se observa un buen ajuste entre el modelo y la realidad, los valores de confiabilidad predichos por el modelo no cuantifican las capacidades

productivas límite de la componente punto de extracción, pues existen registros en que la utilización histórica de la componente fue reducida porque el programa productivo así lo dictaba.

Realizando un ejercicio similar al anterior, pero considerando aquellos registros de productividad sobre el percentil 80% de la distribución anterior, para cada número de eventos registrado en la historia, la distribución resultante es la siguiente:

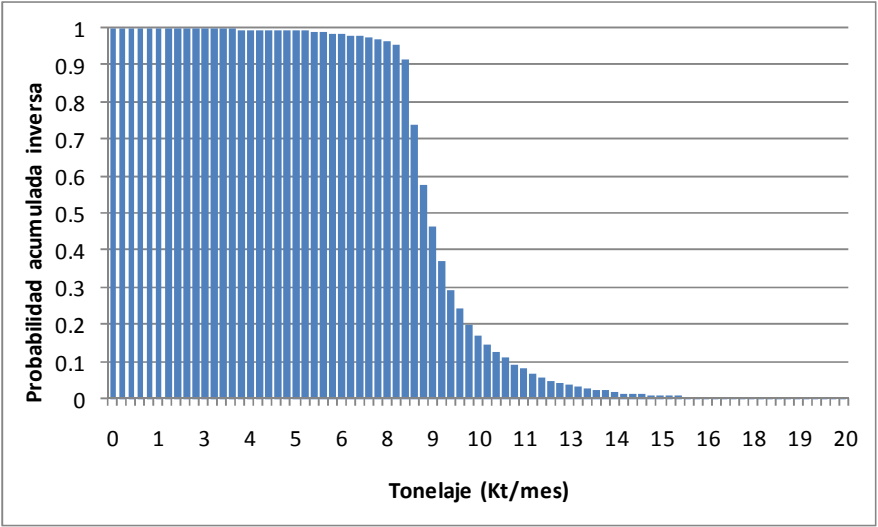


Figura 60. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de puntos de extracción (registros sobre el percentil 80% de la distribución para cada número de eventos).

Naturalmente, al eliminar los registros de productividad menores que el percentil 80%, la probabilidad de ocurrencia de los registros de productividad más elevados es mayor, sin embargo, cuando la curva de producción característica de la componente en cuestión de genera con la misma información de la distribución anterior, la calidad del ajuste entre los datos históricos y los del modelo decrece, como se muestra en la siguiente figura:

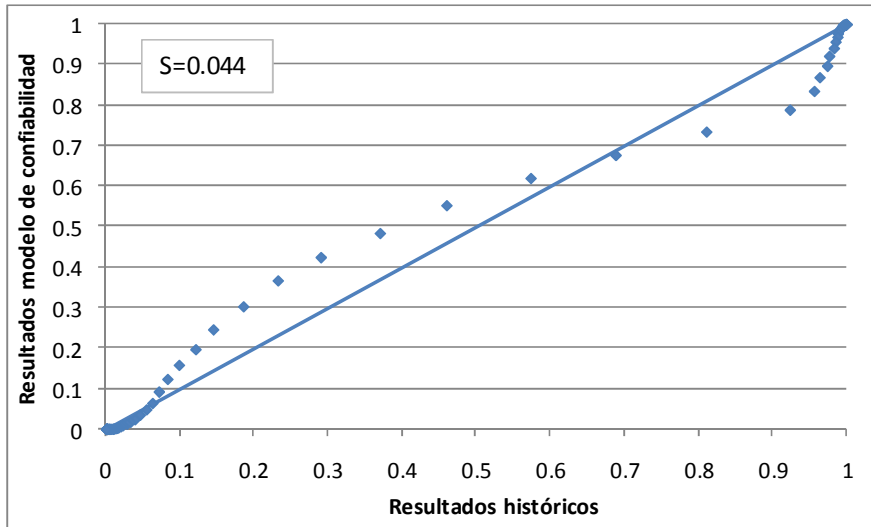


Figura 61. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para puntos de extracción (Registros sobre percentil 80%).

Naturalmente, el ajuste no es tan bueno como el mostrado en la Figura 59, sin embargo el valor de S aún es inferior al 5%. Este aumento de S puede deberse en parte a que la reducción de datos naturalmente afecta en la estimación de parámetros estadísticos. El siguiente gráfico muestra como evoluciona el valor de S a medida que el filtraje de datos para la construcción de la curva PCC es más restrictivo (considerando registros sobre el percentil 10%, 20%, 30% y sucesivos):

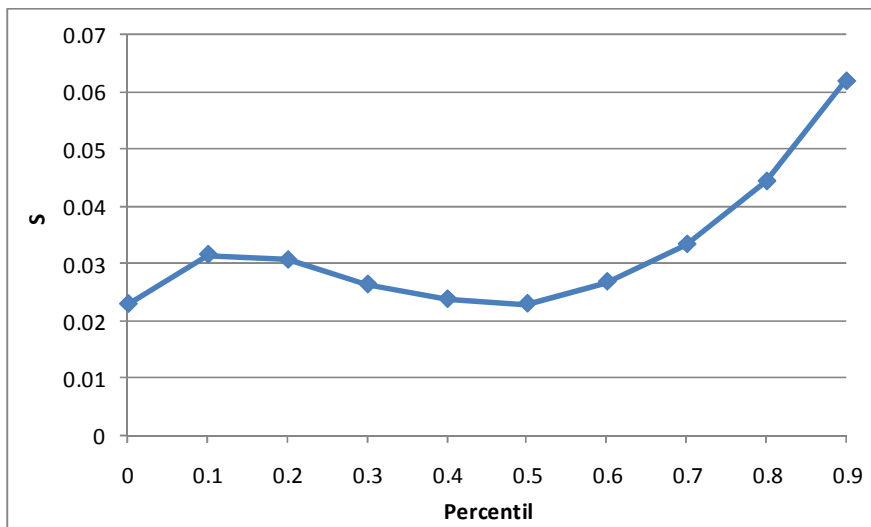


Figura 62. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en puntos de extracción.

Eventualmente, podría considerarse para la construcción de las curvas de producción característica los registros sobre aquel percentil de datos que minimice el valor de S, sin embargo, debido a que no se cuenta con los programas de producción que generaron los registros históricos de productividad resulta imposible saber que valores están limitados por el programa y cuales por las características productivas de la componente, por lo que si bien el resultado de confiabilidad entregado por el modelo tendría la menor dispersión con la historia, no se puede saber si este valor está calculado en base a las capacidades productivas límite.

Túneles de producción

Al igual que en los puntos de extracción, con los registros de productividad histórica de los túneles de producción y su respectiva distribución es posible calcular el porcentaje de valores de productividad que son mayores o iguales a un tonelaje dado. La distribución acumulada inversa de los valores de productividad históricos de los túneles de producción se muestra a continuación:

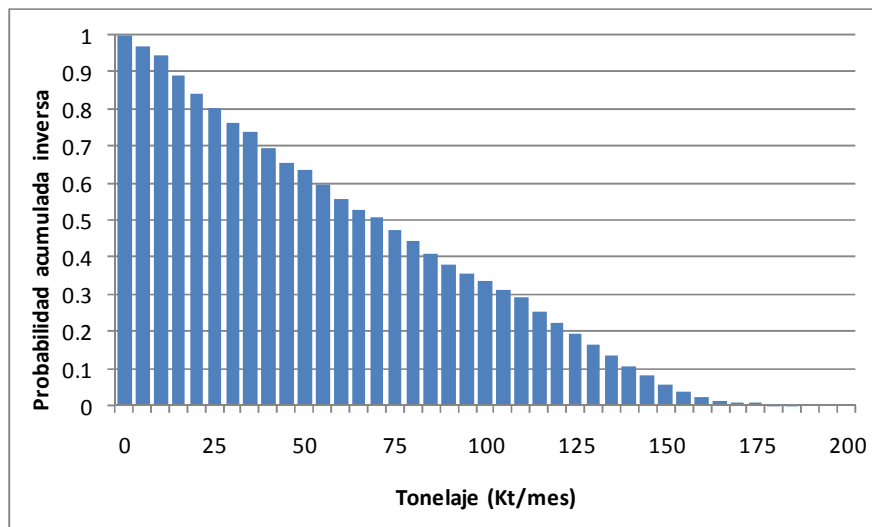


Figura 63. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de túneles de producción.

Cuando la curva de producción característica de los túneles de producción se construye con los registros que dan origen a la distribución mostrada en la Figura 63, la dispersión

entre la confiabilidad histórica, y los valores de confiabilidad calculados por el modelo son los siguientes:

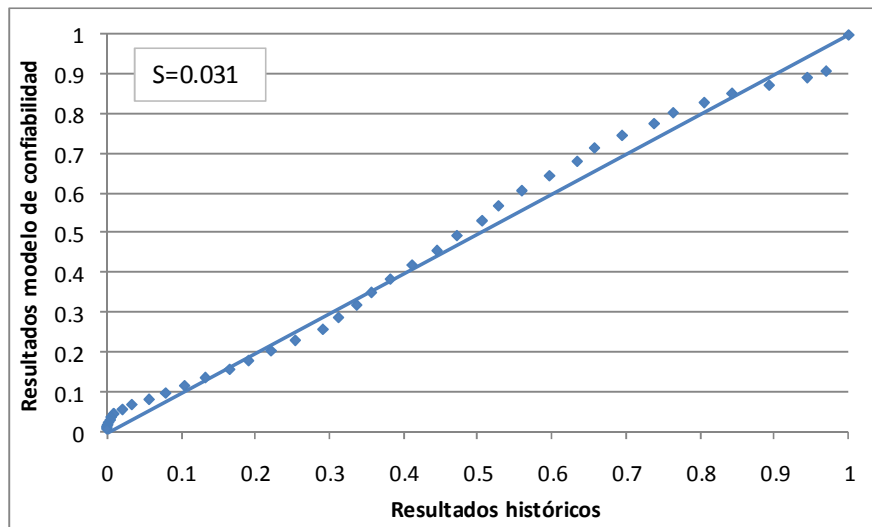


Figura 64. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de producción (todos los registros).

El indicador $S=0.031$ muestra que el ajuste del modelo es aceptable para esta componente, sin embargo, debe considerarse que la distribución de valores de la Figura 63 considera también aquellos registros cuyo valor está acotado por el tonelaje planificado del programa de producción que los generó. Es decir, si bien se observa un buen ajuste entre el modelo y la realidad, los valores de confiabilidad predichos por el modelo no cuantifican las capacidades productivas límite de la componente en cuestión pues existen registros en que la utilización histórica de la componente fue reducida porque el programa productivo así lo dictaba.

Realizando un ejercicio similar al anterior, pero considerando aquellos registros de productividad sobre el percentil 90% de la distribución anterior como un intento de eliminar los registros limitados por el programa productivo, la distribución resultante es la siguiente:

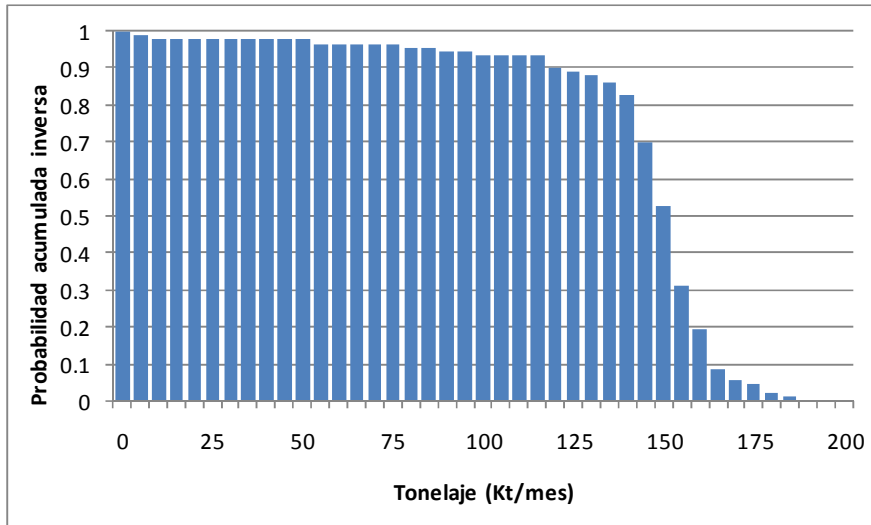


Figura 65. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de túneles de producción (registros sobre el percentil 90% de la distribución para cada número de eventos).

Naturalmente, al eliminar los registros de productividad menores que el percentil 90%, la probabilidad de ocurrencia de los registros de productividad más elevados es mayor, sin embargo, cuando la curva de producción característica de la componente en cuestión de genera con la misma información de la distribución anterior, la calidad del ajuste entre los datos históricos y los del modelo decrece, como se muestra en la siguiente figura:

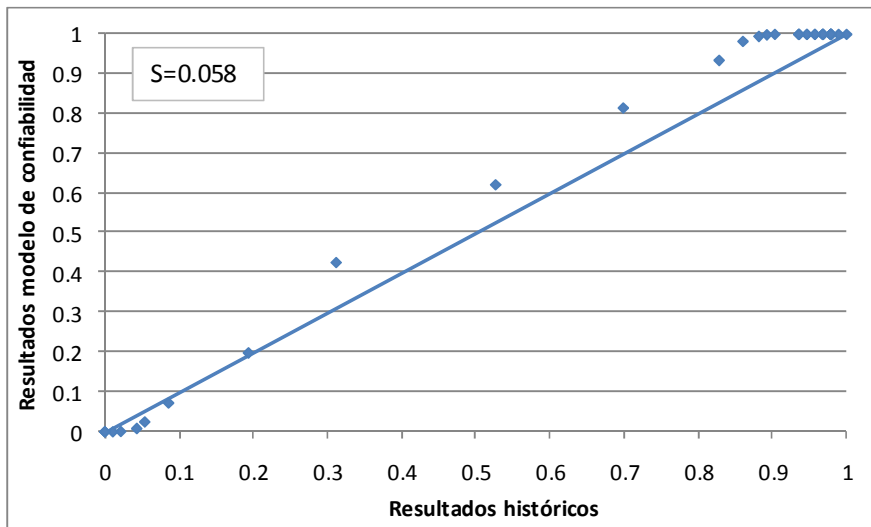


Figura 66. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de producción (registros sobre percentil 90%).

Naturalmente, el ajuste no es tan bueno como el mostrado en la Figura 64, sin embargo el valor de S aún es reducido. Naturalmente, dependiendo del percentil considerado para el filtraje de información el valor de S es diferente. El siguiente gráfico muestra como evoluciona el valor de S a medida que el filtraje de datos para la construcción de la curva PCC es más restrictivo (considerando registros sobre el percentil 10%, 20%, 30% y sucesivos):

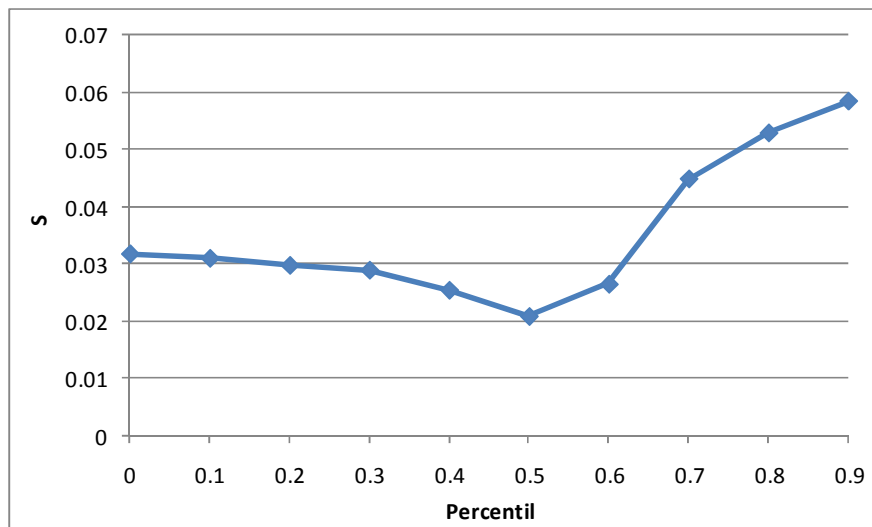


Figura 67. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en túneles de producción.

Eventualmente, al igual que en los puntos de extracción, podría considerarse para la construcción de las curvas de producción característica los registros sobre aquel percentil de datos que minimice el valor de S (50% en este caso), sin embargo, debido a que no se cuenta con los programas de producción que generaron los registros históricos de productividad resulta imposible saber que valores están limitados por el programa y cuales por las características productivas de la componente, por lo que si bien el resultado de confiabilidad entregado por el modelo tendría la menor dispersión con la historia, no se puede saber si este valor cuantifica las capacidades productivas límite.

Piques de traspaso

Como en las componentes analizadas con anterioridad, con los registros de productividad histórica de los piques de traspaso y su respectiva distribución es posible calcular el porcentaje de valores de productividad que son mayores o iguales a un tonelaje dado. La distribución acumulada inversa de los valores de productividad históricos de los piques de traspaso se muestra a continuación:

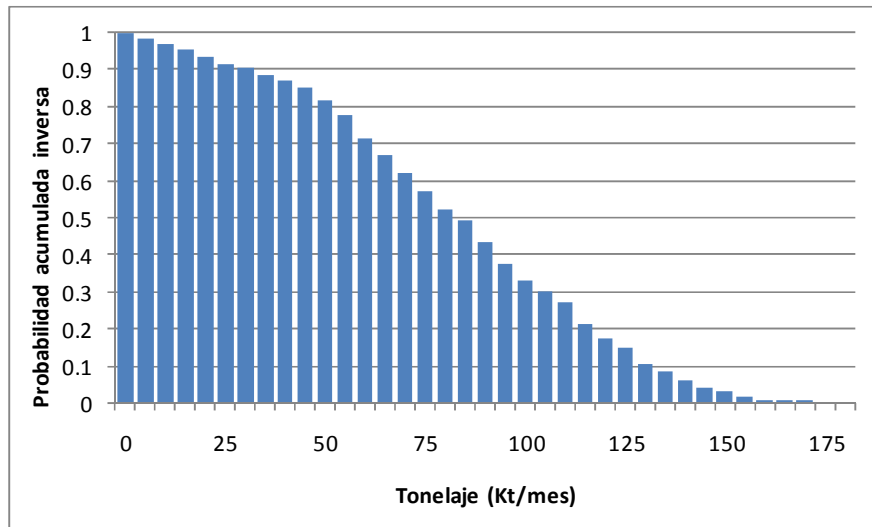


Figura 68. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de piques de traspaso.

Cuando la curva de producción característica de los piques de traspaso se construye con los registros que dan origen a la distribución mostrada en la Figura 55. Curva de producción característica de piques de traspaso actual (2006), registros sobre el percentil 40%, la dispersión entre la confiabilidad histórica, y los valores de confiabilidad calculados por el modelo son los siguientes:

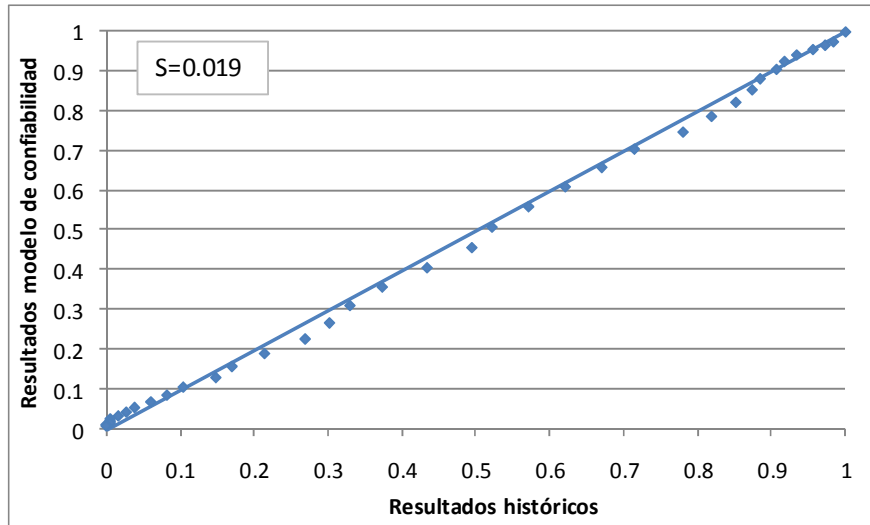


Figura 69. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para piques de traspaso (todos los registros).

Si bien, como se verá más adelante, la utilización de esta información para construir la curvas de producción característica registra uno de los errores más bajos, el hecho que algunos de los registros productivos estén limitados por el plan que los generó y no por las capacidades intrínsecas de la componente podría causar que los valores de confiabilidad entregados por el modelo estén fuertemente subestimados. Ahora, realizando un ejercicio similar al anterior, pero considerando aquellos registros de productividad sobre el percentil 40% de la distribución de la Figura 68, para cada número de eventos registrado en la historia, la distribución acumulada inversa resultante es la siguiente:

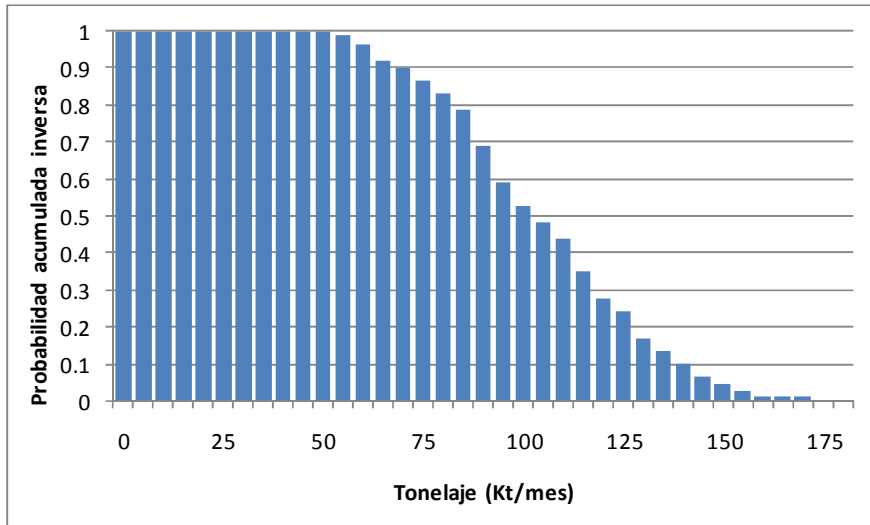


Figura 70. Distribución acumulada inversa de registros de productividad históricos de piques de traspaso (registros sobre el percentil 40% de la distribución para cada número de eventos).

Presumiblemente, al eliminar los registros de productividad menores que el percentil 40%, la probabilidad de ocurrencia de los registros de productividad más elevados es mayor, sin embargo, cuando la curva de producción característica de la componente en cuestión de genera con la misma información de la distribución anterior, la calidad del ajuste entre los datos históricos y los del modelo decrece, como se muestra en la siguiente figura:

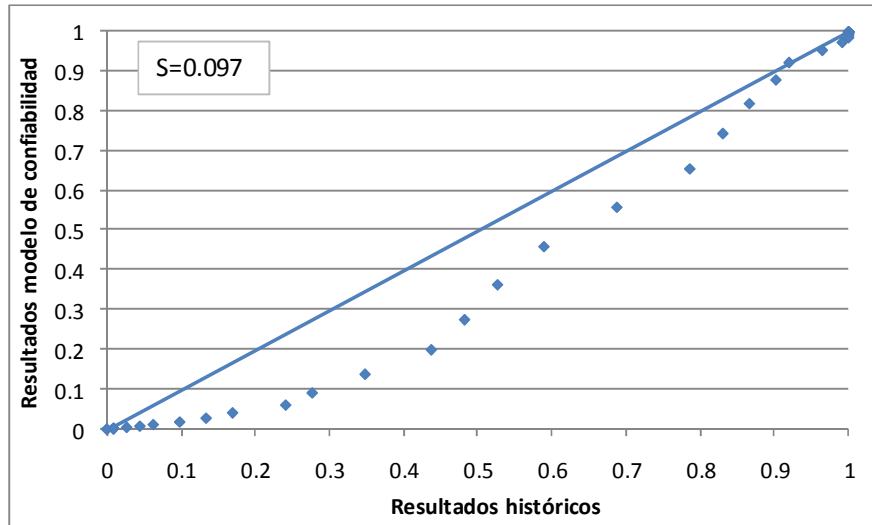


Figura 71. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para piques de traspaso (registros sobre percentil 40%).

Si bien el ajuste no es tan bueno como el de la Figura 69, la magnitud del error sigue siendo relativamente pequeña, del orden de 10%. Por otro lado, puede notarse que la confiabilidad calculada por el modelo es virtualmente siempre menor que la denominada confiabilidad histórica, por lo que en el peor de los casos, el modelo estaría subestimando la confiabilidad de la componente en cuestión. Por su parte, el siguiente gráfico muestra como evoluciona el valor de S a medida que el filtraje de datos para la construcción de la curva PCC es más restrictivo (considerando registros sobre el percentil 10%, 20%, 30% y sucesivos):

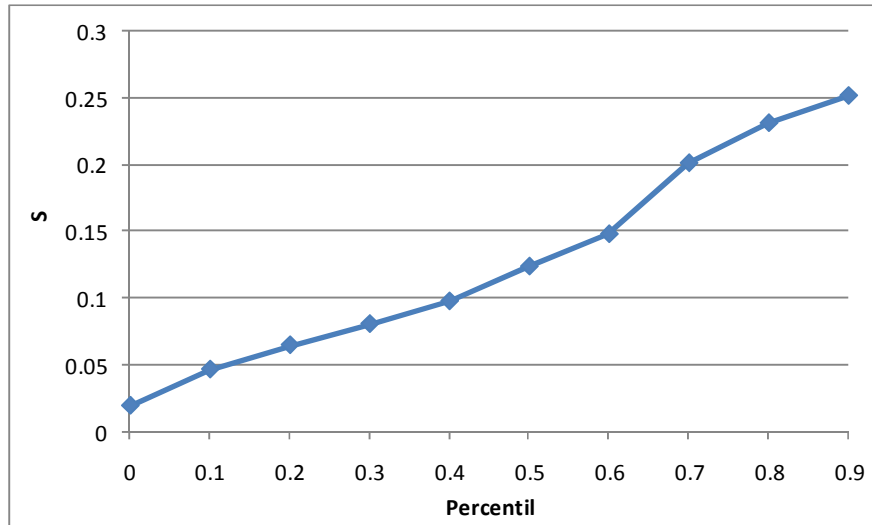


Figura 72. Evolución de S con el percentil de datos considerado para el filtraje de datos en piques de traspaso.

En este caso particular, la dispersión cuantificada por el valor de S aumenta considerablemente conforme el filtraje de información es más restrictivo, hasta alrededor de 25% para los registros sobre el percentil 90%. Este hecho se debe a la escasa cantidad de información disponible para calcular las curvas que describen el comportamiento productivo de los piques de traspaso, que sólo abarcan 1 año de producción histórica.

Túneles de transporte

Para los túneles de transporte, las curvas de producción característica consideran la productividad en función del número de piques de traspaso que alimentan un túnel de transporte específico. Como se mostró anteriormente, el número de registros productivos históricos de túneles de transporte con que se cuenta es reducido. Por lo anterior, la validación del modelo para este tipo de componente se realizará considerando un túnel de producción alimentado por un total de 8 piques de traspaso.

Los escasos registros de productividad históricos para un cruzado de transporte alimentado por 8 piques de traspaso permiten generar el siguiente gráfico, que muestra la probabilidad acumulada inversa de los registros históricos:

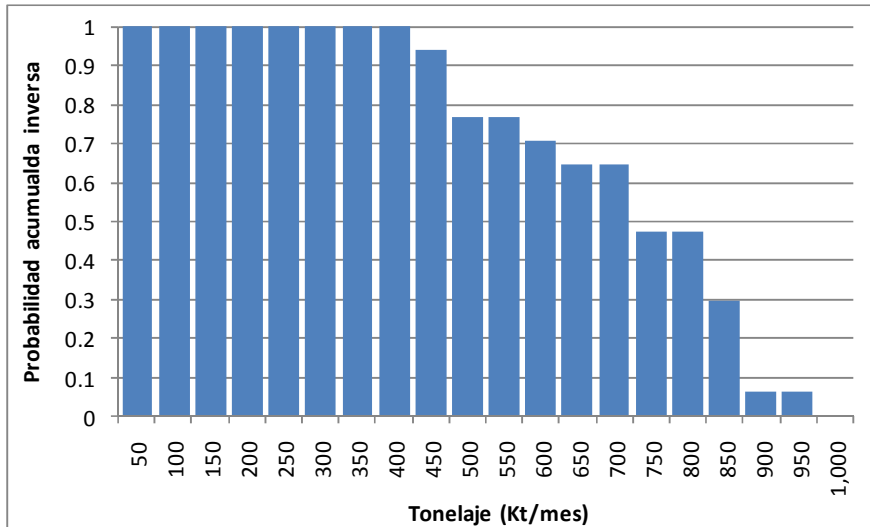


Figura 73. Distribución acumulada inversa de los registros productivos históricos de túnel de transporte (8 piques de traspaso).

Así, la dispersión entre la denominada confiabilidad histórica y los resultados del modelo de confiabilidad para un túnel de transporte alimentado por 8 piques de traspaso es la mostrada en la siguiente figura:

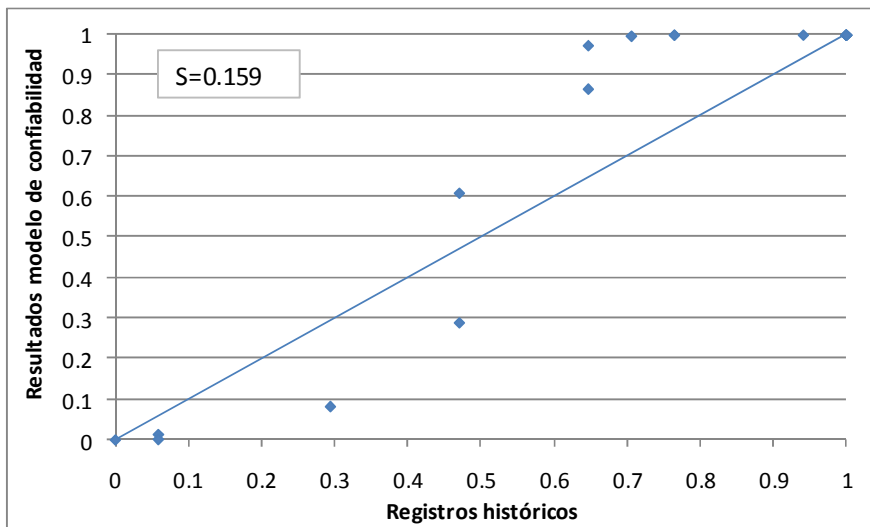


Figura 74. Dispersión de confiabilidad del modelo y confiabilidad histórica para túneles de transporte (8 piques de traspaso).

La dispersión encontrada, cercana al 16%, es poco concluyente debido al escaso número de registros utilizado para generar la confiabilidad histórica.

La siguiente tabla resume los valores de dispersión mínimos y los considerados para el modelo de confiabilidad para cada componente. Se muestra además el percentil de datos considerado para el filtraje de datos:

Componente	Mínimo		Modelo de confiabilidad	
	S	Percentil (%)	S	Percentil (%)
DP	0.023	0	0.044	80
PC	0.021	50	0.058	90
OP	0.019	0	0.098	40
HC	-	-	-	-

Tabla 7. Validación del modelo de confiabilidad.

5 Experimentos sector DOZ-ESZ y análisis de resultados

5.1 Programa de producción para alcanzar 80 Ktpd

Los planes productivos de los sectores DOZ-ESZ consideran alcanzar una producción diaria de 80,000 toneladas hacia finales del año 2009. A mediados del 2007 se alcanzó una producción cercana a las 50,000 t/d, que para finales del periodo 2008 debe incrementarse hasta aproximadamente 70,000 t/d según muestra el siguiente programa de producción:

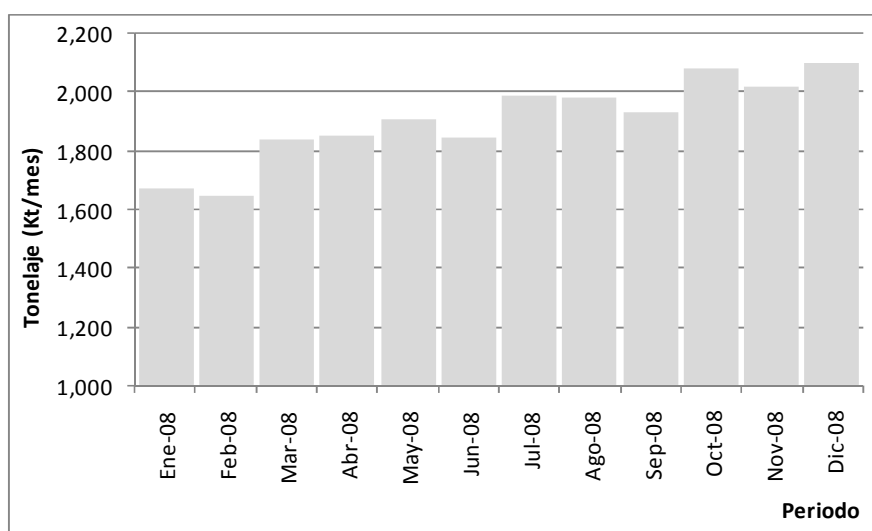


Figura 75. Programa de producción del periodo 2008.

Considerando la infraestructura disponible en cada periodo del programa (según el programa de preparaciones), puede calcularse la confiabilidad del mismo, que se resume por periodos en la siguiente tabla:

Periodo	Confiabilidad
Ene-08	100.00%
Feb-08	100.00%
Mar-08	100.00%
Abr-08	99.98%
May-08	99.69%
Jun-08	99.77%
Jul-08	98.82%
Ago-08	98.76%
Sep-08	99.74%
Oct-08	94.40%
Nov-08	91.40%
Dic-08	82.09%

Tabla 8. Confiabilidad mensual programa de producción 2008.

Como se observa en la tabla anterior, los meses del periodo 2008 presentan en general una confiabilidad elevada, que tiende a disminuir conforme aumenta el tonelaje extraído de la mina, sin embargo, al observar la figura siguiente puede verse que a nivel de puntos de extracción no existen diferencias relevantes entre un periodo y otro, lo que permite intuir que probablemente, el descenso de confiabilidad observado a nivel mina es atribuible a las componentes situadas aguas abajo de los puntos de extracción.

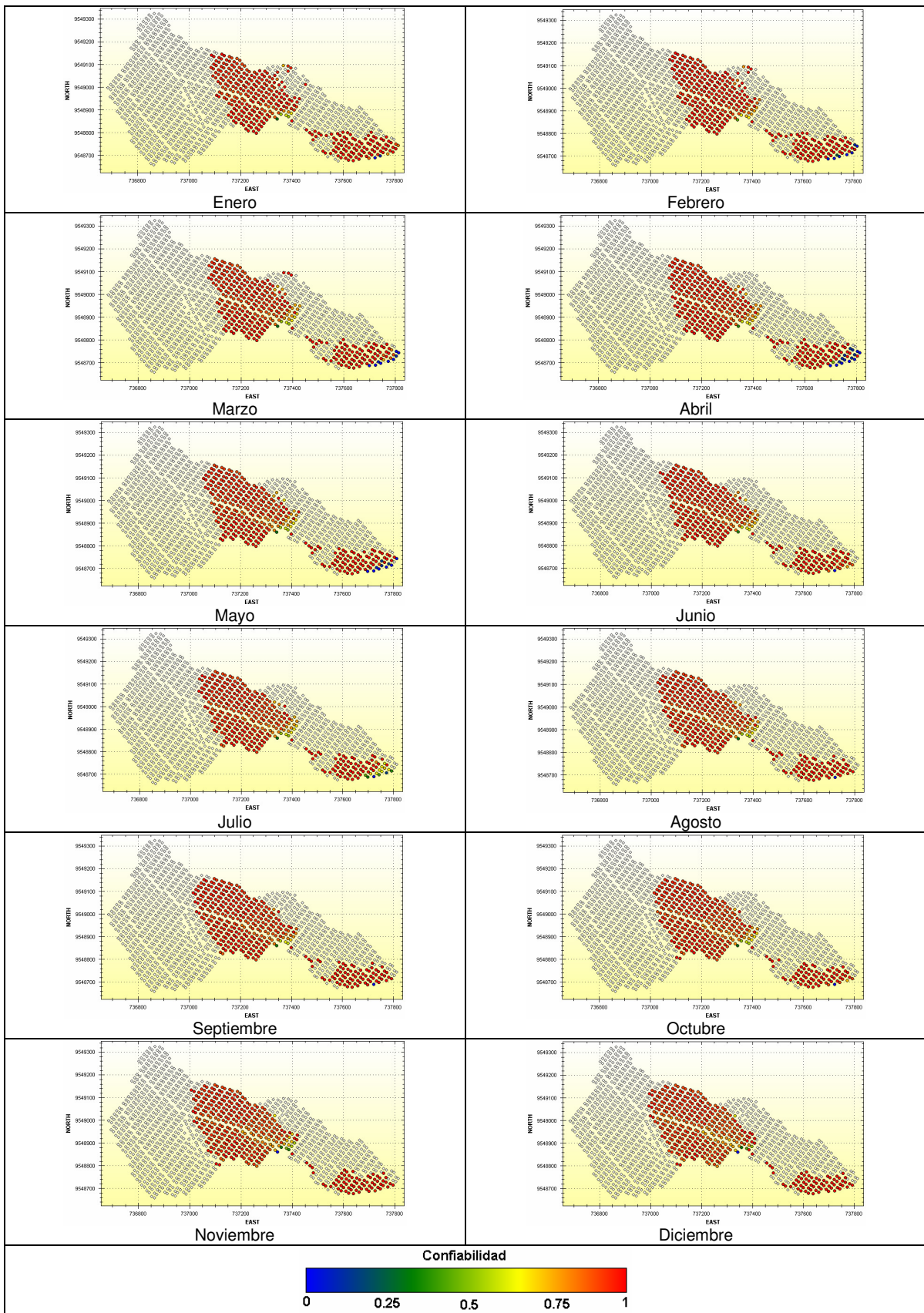


Figura 76. Confiabilidad de puntos de extracción programa de producción 2008.

5.2 Tonelaje libre de riesgo

El tonelaje libre de riesgo se define como el tonelaje máximo que puede extraerse de una componente o sistema con una confiabilidad del 100%. Por ejemplo, para un punto de extracción caracterizado por sus curvas U y PCC, el siguiente gráfico muestra la evolución de la confiabilidad de dicha componente conforme aumenta su tonelaje planificado, para diferentes frecuencias de eventos:

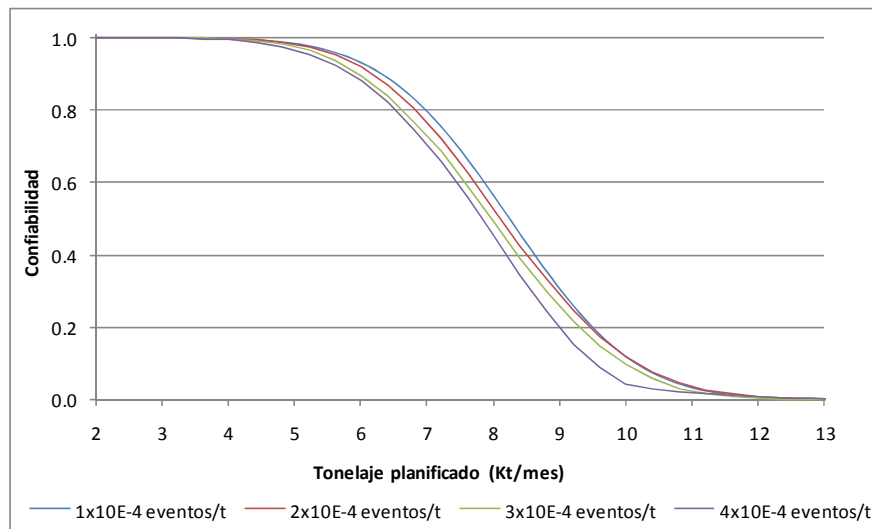


Figura 77. Confiabilidad versus tonelaje planificado para un punto de extracción y diferentes frecuencias de eventos.

Puede observarse en la gráfica anterior que naturalmente la confiabilidad de la componente en análisis disminuye conforme aumenta su tonelaje planificado, debido a que el área bajo la curva de distribución de tonelaje obtenida de la curva de producción característica, para un determinado número de eventos se reduce conforme aumenta el tonelaje planificado. Por su parte, el tonelaje libre de riesgo disminuye levemente conforme se incrementa la frecuencia de eventos, lo que puede apreciarse de mejor forma en el siguiente gráfico:

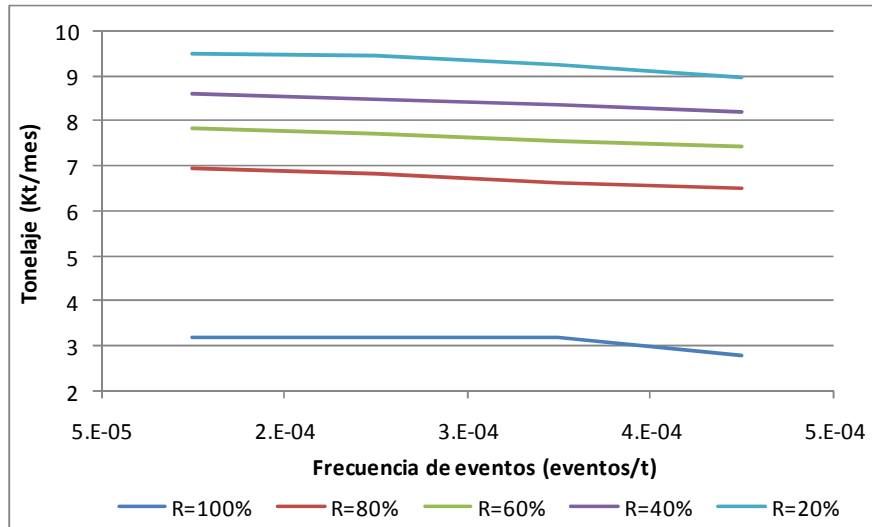


Figura 78. Tonelaje versus frecuencia de eventos para confiabilidad constante en puntos de extracción.

Como se mencionó anteriormente, la disminución del tonelaje libre de riesgo, conforme aumenta la frecuencia de eventos, es mínima (la mayor variación es del orden de 800t/mes, equivalente al 6% del tonelaje libre de riesgo). Por su parte, las variaciones de tonelaje para otros valores de confiabilidad fijos presentan un comportamiento similar, también con variaciones del orden del 6% en cada caso. Es decir, para un punto de extracción analizado como componente individual, la frecuencia de eventos tiene poco impacto en el tonelaje libre de riesgo. Sin embargo, para un tonelaje planificado dado, las variaciones de confiabilidad generadas por variaciones en la frecuencia de eventos son más importantes (de hasta un 20%).

Un ejercicio similar al anterior puede realizarse a nivel de cualquier otra componente en forma individual, pero también, y más interesante aún, es el cálculo del tonelaje libre de riesgo del sistema minero completo, para un estado de infraestructura disponible dado. El siguiente gráfico muestra la evolución de la confiabilidad conforme se incrementa el tonelaje planificado (aumentando proporcionalmente el tonelaje del programa de producción del periodo 2008):

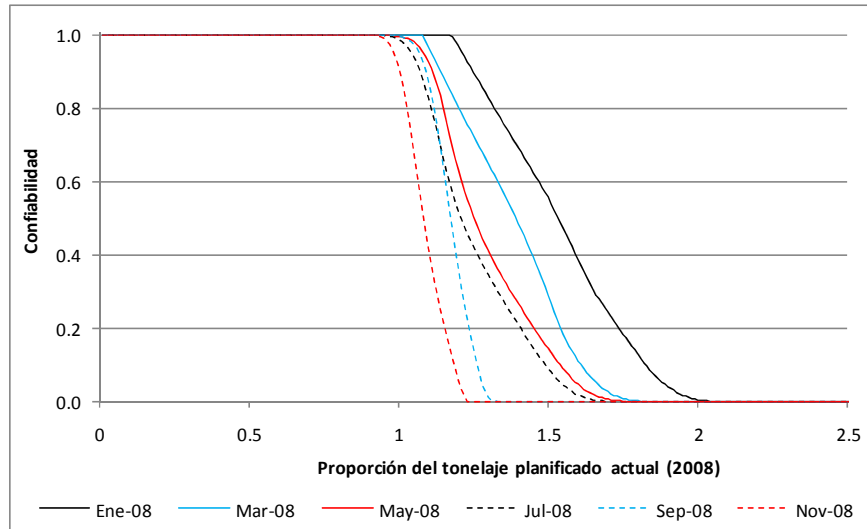


Figura 79. Confiabilidad versus proporción del tonelaje planificado actual (2008).

El tonelaje libre de riesgo en cada periodo del programa se muestra en el siguiente gráfico (R=100%):

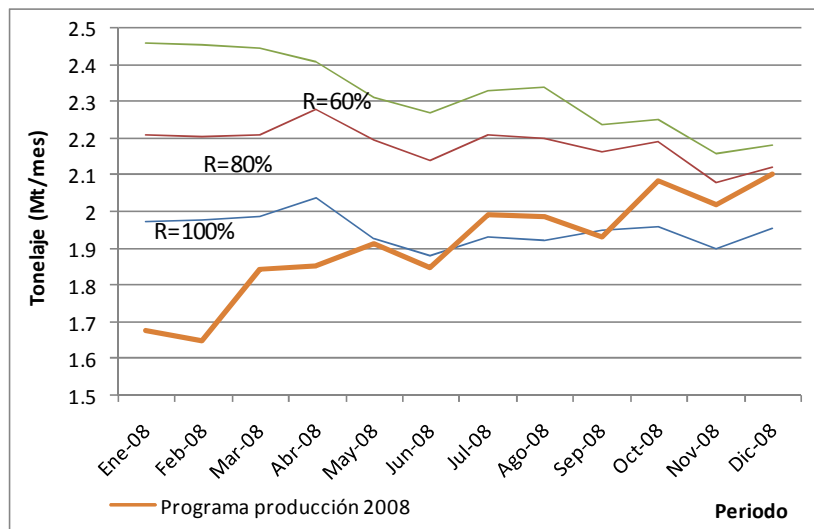


Figura 80. Evolución del tonelaje en el tiempo para valores fijos de confiabilidad (distribución de flujo proporcional al programa de producción).

La primera observación de interés es que entre los periodos ene-08 y jul-08, el tonelaje del programa se encuentra bajo el tonelaje libre de riesgo, por lo que eventualmente podrían incrementarse los tonelajes comprometidos en dichos periodos, de manera de acelerar el ramp-up productivo sin aumentar la probabilidad de falla del programa de

producción. Sin embargo, a partir del mes de julio del año en cuestión, se observa que el tonelaje libre de riesgo tiende a estabilizarse alrededor de los 2 Mt/mes (67,000 t/d), lo que se traduce en la necesidad de disminuir la probabilidad de cumplimiento del programa para continuar con el ramp-up, sin realizar modificaciones en la infraestructura productiva disponible, que se resume en la siguiente tabla:

Periodo	Puntos de extracción	Túneles de producción	Piques de traspaso	Túneles de transporte
Ene-08	370	25	27	3
Feb-08	373	25	27	3
Mar-08	377	25	27	3
Abr-08	380	25	28	3
May-08	383	25	28	3
Jun-08	386	26	29	3
Jul-08	392	26	29	3
Ago-08	398	26	29	3
Sep-08	405	26	30	3
Oct-08	411	25	29	3
Nov-08	417	26	30	3
Dic-08	422	26	31	3

Tabla 9. Número total de componentes disponibles por periodo según programa de producción 2008.

Ahora, si en lugar de utilizar proporciones del plan de producción original, se consideran proporciones de un programa de producción virtual en que a todos los puntos de extracción activos se le extrae el mismo tonelaje y la distribución de éste al interior del sistema minero es equitativa entre componentes relacionadas, el resultado es el siguiente:

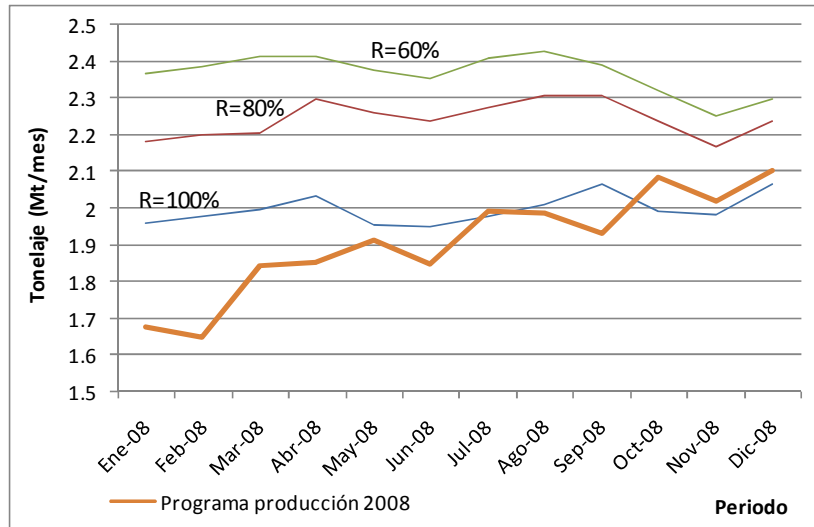


Figura 81. Evolución del tonelaje en el tiempo para valores fijos de confiabilidad (distribución de flujo equitativa entre componentes relacionadas)

Puede observarse que, en comparación al caso anterior, el tonelaje libre de riesgo en cada periodo del programa se incrementa, lo que permite inferir que el tonelaje libre de riesgo es función de la distribución del flujo de mineral al interior del sistema minero. Sin embargo este programa de producción virtual no considera otras restricciones inherentes al proceso de explotación, como se menciona en el capítulo Análisis de componentes críticas. A pesar de lo anterior, el resultado obtenido descubre la importancia del sistema de manejo de materiales y la distribución de tonelaje al interior del mismo en la consecución de las metas productivas.

Adicionalmente, puede observarse al comparar la Figura 80 y la Figura 81 que al cambiar la distribución de flujo al interior del sistema minero, además de incrementarse el tonelaje libre de riesgo y el tonelaje para otros niveles fijos de confiabilidad en cada periodo, la tendencia decreciente para confiabilidades 60% y 80% se reduce e incluso, para una confiabilidad 80% presenta una tendencia creciente en el segundo caso. Si se considera además que en cada periodo el número de componentes disponibles es diferente y tiende a aumentar su número (Tabla 9), puede inferirse que el incremento del número disponible de componentes está relacionado con las capacidades productivas para un nivel dado de confiabilidad, sin embargo, la forma en que se utiliza esta infraestructura es relevante en esta capacidad. Es decir que eventualmente, el hecho de incorporar una componente de infraestructura adicional podría reducir la confiabilidad del programa en vez de

aumentarla. Para ejemplificar lo anterior, considérese un programa de producción que no considera la utilización del pique LP06S desde el mes de julio de 2008 en adelante, mostrado en la siguiente figura:

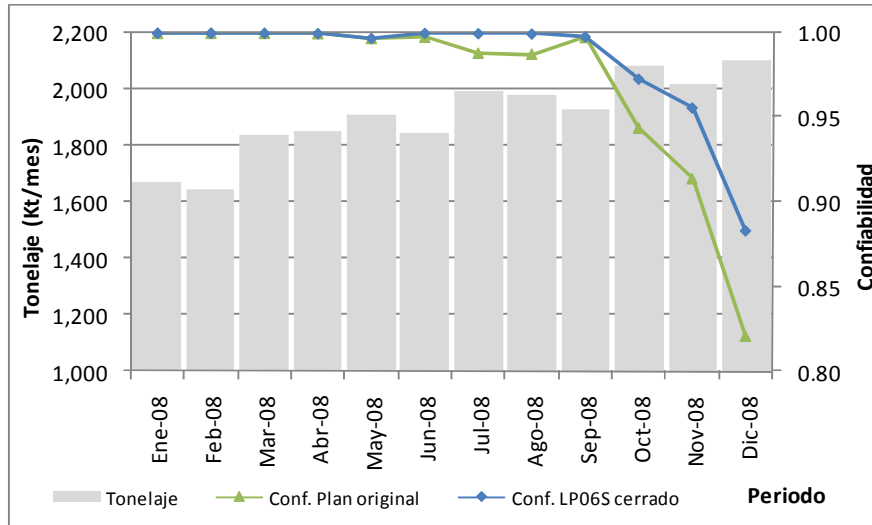


Figura 82. Confiabilidad del programa de producción 2008 sin utilizar el LP06S.

Puede observarse que la no utilización del pique LP06S, se traduce en un aumento de la confiabilidad del programa de producción resultado de reasignar todo el tonelaje del LP06S al LP06, que se encuentra en el mismo panel de producción. Por ejemplo, en diciembre de 2008, el tonelaje del LP06 pasa de 82Kt/mes a 164Kt/mes lo que se traduce en una reducción de la confiabilidad de la componente aislada de 80.1% a 0.3%. Sin embargo, la confiabilidad a la salida del pique de traspaso (considerando las componentes aguas arriba) cambia de 8.2% a 0%, dado que la componente saturada es el túnel de producción y en ambos casos el tonelaje que debe movilizarse a través de él es el mismo, 164Kt/mes). A Pesar de la reducción anterior, si se considera que el pique LP06 pertenece al cruzado de transporte HC2, que en dicho periodo cuenta con un total de 16 piques de traspaso, las redundancias existentes generan que la confiabilidad del cruzado de transporte completo (como subsistema DP-PC-OP-HC) cambie de 1.1% a 0.2%. Sin embargo, al no utilizar el pique LP06S, el tonelaje a movilizar por el cruzado de transporte HC3 se reduce de 366Kt/mes a 284Kt/mes lo que incrementa la confiabilidad del subsistema DP-PC-OP-HC de dicho cruzado desde 70.9% a 83.3%. Finalmente, al considerar la conexión en K out of N entre los 3 cruzados de transporte de la mina, la

confiabilidad en dicho periodo aumenta desde 82.1% a 88.3% por la no utilización del pique LP06S.

5.3 Análisis de componentes críticas

Una de las utilidades del modelo de confiabilidad es facilitar la detección de cuellos de botella dentro en el flujo de mineral al interior del sistema minero. Lo anterior entrega al planificador la posibilidad de redistribuir el flujo de tonelaje al interior del sistema de manera de aumentar la probabilidad de cumplimiento del programa de producción en análisis.

Considérese el siguiente gráfico que muestra la evolución de la confiabilidad a nivel mina para el programa de producción del año 2008:

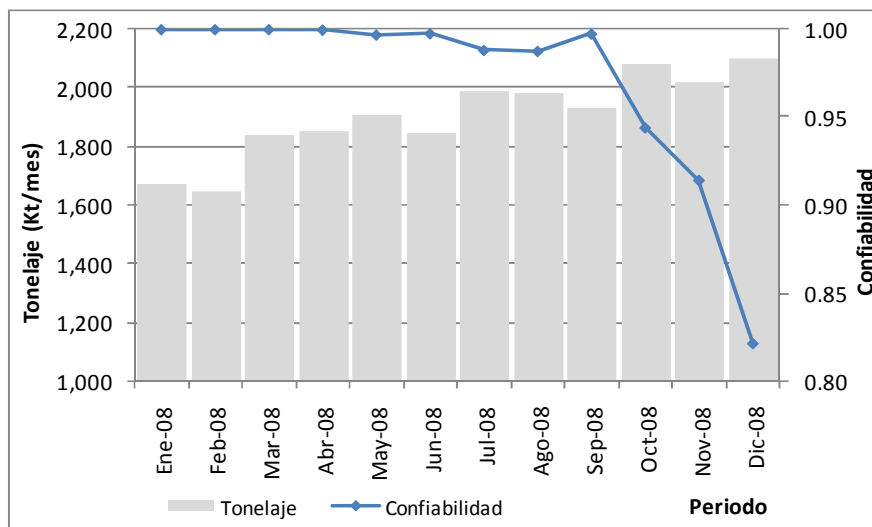


Figura 83. Confiabilidad programa de producción DOZ-ESZ periodo 2008.

Puede observarse que, en general, la confiabilidad de todos los periodos considerados es elevada, sin embargo se observa una tendencia a la disminución conforme las capacidades productivas son incrementadas (oct-08, nov-08 y dic-08). Según las relaciones de conectividad consideradas en el modelo de confiabilidad, la probabilidad de cumplimiento del programa de producción de la mina se calcula en base a la confiabilidad de los cruzados de transporte. Para analizar más profundamente esta disminución de confiabilidad, considérese entonces la evolución de la confiabilidad para cada cruzado de transporte durante el periodo en análisis (2008):

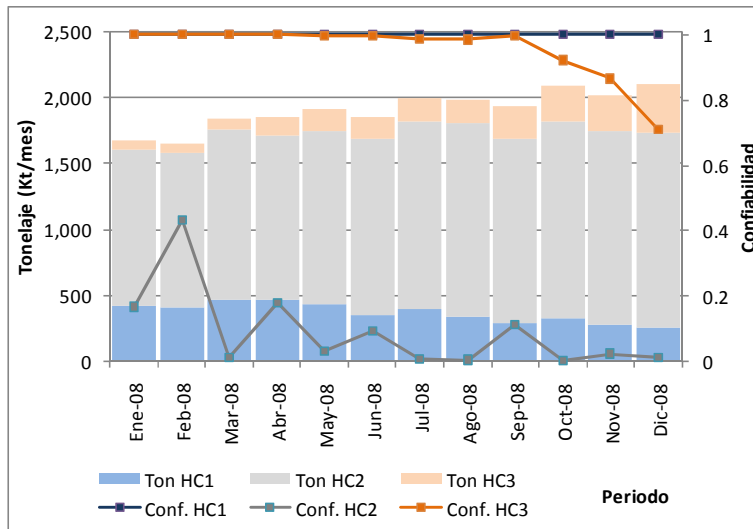


Figura 84. Confiabilidad por cruizados de transporte, periodo 2008.

Es preciso señalar que la confiabilidad del gráfico anterior considera todas las componentes aguas arriba de cada cruzado de transporte, es decir corresponde al sistema DP-PC-OP-HC descrito en el modelo de confiabilidad. Se observa primeramente que el cruzado de transporte HC1 no presenta problemas para movilizar el tonelaje planificado a través de él, pues posee confiabilidad 100% en todos los periodos analizados, por lo tanto, la baja confiabilidad en los tres últimos meses del año 2008 es atribuible a los bajos valores de confiabilidad de los cruizados HC2 y HC3 en los periodos en cuestión.

Debido a que el cruzado de transporte HC2 concentra la mayor parte del tonelaje y presenta la confiabilidad más baja, el análisis siguiente se centrará en dicho cruzado. Considérese ahora el siguiente gráfico, que muestra la evolución de la confiabilidad del cruzado HC2 separada por componentes: túnel de transporte y subsistema DP-PC-OP:

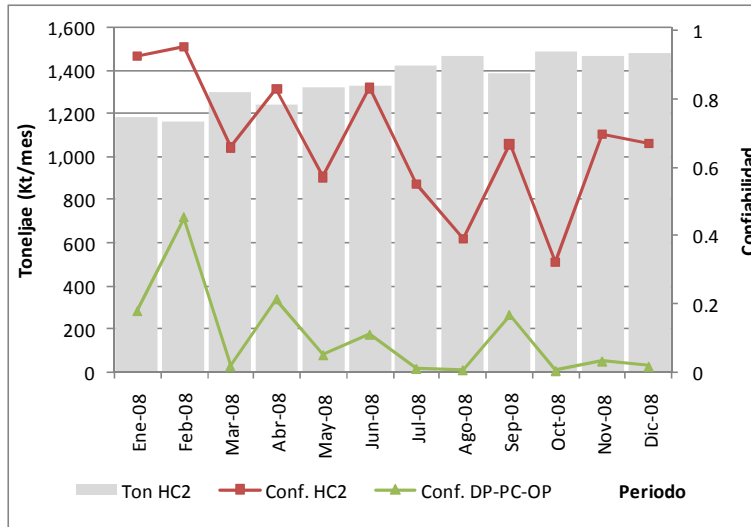


Figura 85. Composición de la confiabilidad del cruzado de transporte HC2, periodo 2008.

Por ejemplo, analizando en mayor detalle el periodo oct-08 puede observarse que en dicho periodo ambas componentes (túnel de transporte y el subsistema DP-PC-OP) presentan confiabilidad reducida, lo que debido a la conexión en serie de ambas componentes se traduce en la baja confiabilidad del cruzado de transporte completo en dicho periodo. La confiabilidad reducida del túnel de transporte se explica directamente de la metodología de cálculo de confiabilidad para dicha componente. El número total de piques de traspaso disponibles en dicho periodo asciende a un total de 15, considerando el programa de preparaciones. La distribución de valores de productividad de la curva de producción característica para ese número de piques de traspaso es la siguiente:

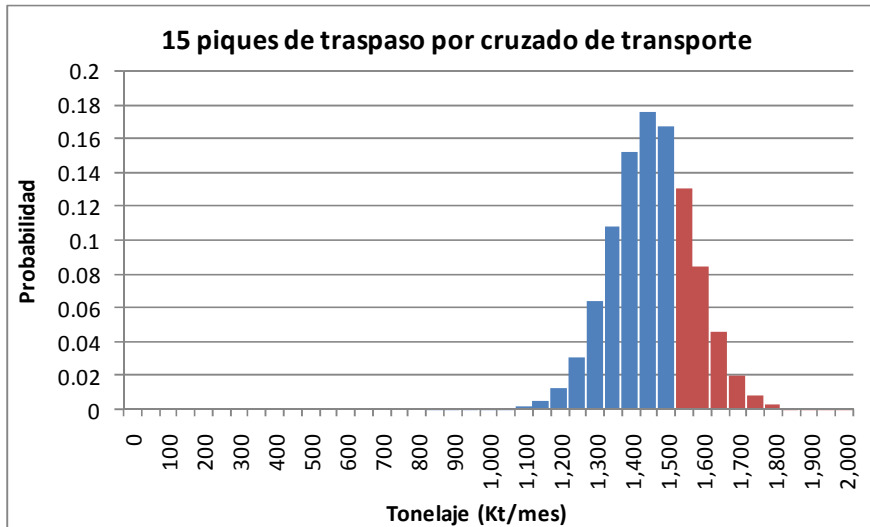


Figura 86. Distribución de productividad de un cruzado de transporte con 15 piques activos.

El área bajo la curva pintada en rojo corresponde a la probabilidad que el tonelaje movilizado a través del túnel de transporte HC2 sea mayor o igual a 149 Kt/mes (tonelaje planificado) y alcanza un valor de 32.1%. Para entender el comportamiento del sistema DP-PC-OP del cruzado de transporte HC2 en el periodo oct-08 es necesario descomponerlo en componentes, lo que se muestra en el siguiente gráfico:

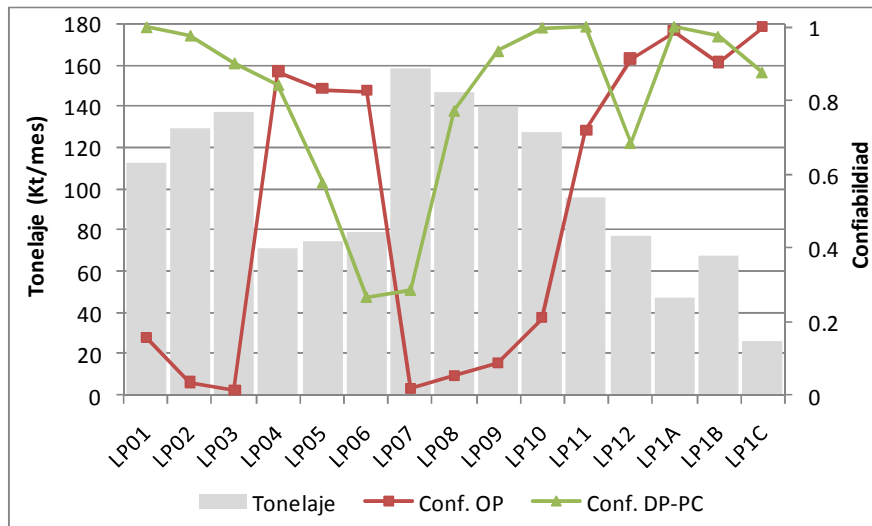


Figura 87. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC-OP de los piques de traspaso asociados al cruzado de transporte HC2, octubre 2008.

Puede observarse en el gráfico anterior que, en general, el pique de traspaso (como componente individual) es un cuello de botella para el flujo de mineral cuando el tonelaje planificado es elevado (sobre las 100Kt/mes), lo que se explica directamente al tener en cuenta la metodología de cálculo de la confiabilidad de dicha componente: estimación de número de eventos desde la curva U y posterior cálculo de confiabilidad desde la curva PCC. Un caso interesante de analizar con mayor detalle es el observado en los piques de traspaso LP02 y LP10. Ambos tienen aproximadamente el mismo tonelaje planificado, sin embargo sus confiabilidades son diferentes: ~0% y 20.9% respectivamente. Este hecho tiene directamente relación con la madurez de cada componente y la geometría de la curva U de los piques de traspaso. En el caso del LP02 su madurez al iniciar el periodo en cuestión (octubre 2008) es de 1,033Kt, que tiene asociada una frecuencia de eventos de 1.79×10^{-4} eventos por tonelada, lo que dado su tonelaje planificado se traduce en 20 eventos por mes. Por otro lado, el LP10 posee una madurez de 4,268Kt al iniciar el periodo, que tiene asociada una frecuencia de eventos de 1.26×10^{-5} eventos por tonelada, lo que dado su tonelaje planificado se traduce en sólo 3 eventos por mes. Según la parametrización de la curva PCC de los piques de traspaso, la productividad media asociada a 20 eventos por mes es de 86.1Kt/mes, mientras que para 3 eventos alcanza un valor de 107.9Kt/mes, lo que explica el fenómeno.

Analizando la confiabilidad del subsistema DP-PC de cada pique de traspaso se observan los siguientes casos de interés:

- Caso 1: confiabilidad elevada y tonelaje planificado reducido (como en los subsistemas DP-PC de los piques de traspaso LP11, LP1A, LP1B y LP1C)
- Caso 2: confiabilidad reducida y tonelaje planificado elevado (LP03, LP07, LP08 y LP09).
- Caso 3: confiabilidad reducida y tonelaje planificado reducido (LP04, LP05, LP06 y LP12).
- Caso 4: confiabilidad elevada y tonelaje planificado elevado (LP01, LP02 y LP10).

El comportamiento de la confiabilidad de los casos 1 y 2 es intuitivo al considerar la metodología de cálculo de confiabilidad de una componente (estimación de número de eventos y lectura de la curva de producción característica). Naturalmente, el área bajo la curva de distribución de valores de productividad leída desde la curva PCC disminuye

conforme aumenta el tonelaje planificado, lo que obviamente genera valores de confiabilidad reducidos para tonelajes planificados elevados y viceversa. Eventualmente, para mejorar los valores de confiabilidad en estos casos (cuando se presentan ambos) es reducir el tonelaje planificado en aquellas componentes del caso 2 y redistribuir el diferencial de tonelaje en las componentes del caso 1. Sin embargo, el ejercicio anterior debe ser siempre reevaluado en el modelo de confiabilidad pues el aumento en confiabilidad por reducción de tonelaje en componentes del caso 2 puede ser menor que la disminución de confiabilidad por aumento de tonelaje en componentes del caso 1.

El comportamiento observado en el caso 3 es más complejo y requiere adentrarse en la confiabilidad del subsistema DP-PC. El siguiente gráfico muestra la descomposición de la confiabilidad del subsistema DP-PC asociado a los piques de traspaso LP04, LP05, LP06 y LP12, que se asocian a los paneles 04, 05, 06 y 12 respectivamente:

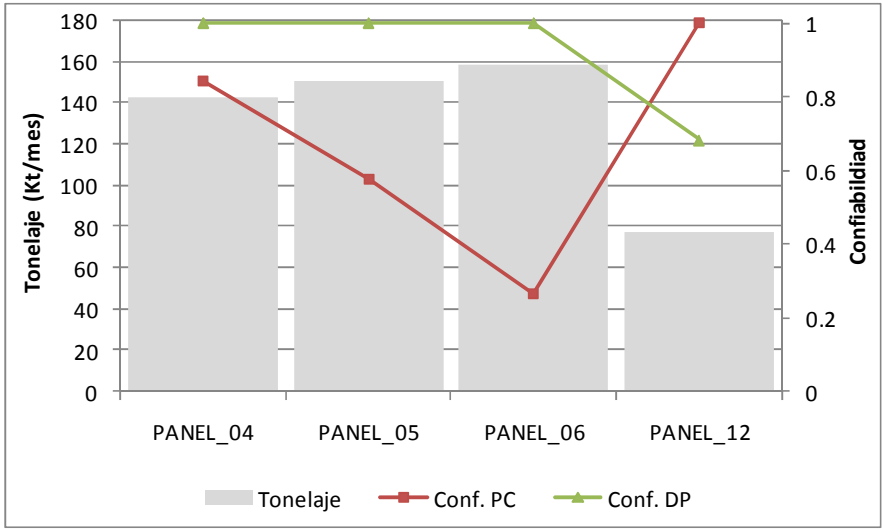


Figura 88. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC de paneles con confiabilidad reducida y tonelaje planificado reducido (caso 3), octubre 2008.

La primera observación de interés es que para los paneles 04, 05 y 06 el tonelaje planificado corresponde al doble de tonelaje que los piques LP04, LP05 y LP06. Este hecho se debe a que en el periodo oct-08 estos cruzados de producción poseen dos piques de traspaso: LP04S, LP05S y LP06S respectiva y adicionalmente a los piques mencionados anteriormente. En los paneles en cuestión puede observarse que el cuello de botella en el flujo de mineral está en el túnel de producción, pues presenta las

confiabilidades más bajas. Este hecho se debe a que según las curvas de producción características de los túneles de producción, la probabilidad que el tonelaje sea mayor que el planificado es reducida, de acuerdo a los registros históricos de productividad. La situación del panel 12 es diferente, cuenta con un único pique de traspaso, por lo que todo el tonelaje extraído desde el túnel de producción cuenta con una única salida. En este caso, la limitante al flujo de mineral está dada por el sistema de puntos de extracción, con una confiabilidad cercana al 70%, y no el túnel de producción, ya que este debe movilizar sólo 77 Kt/mes en el periodo en cuestión. La siguiente gráfica muestra la confiabilidad de los puntos de extracción activos del panel 12 en el periodo en análisis:

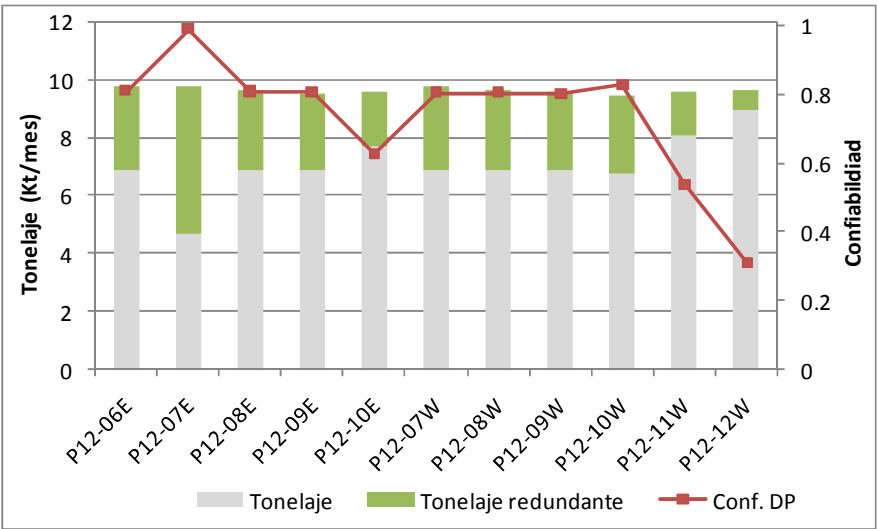


Figura 89. Confiabilidad de puntos de extracción del Panel 12, octubre 2008.

En el gráfico anterior, la serie “Tonelaje redundante” corresponde a la diferencia entre el tonelaje nominal del punto de extracción (obtenido desde la curva de velocidad de extracción, ver anexos) y el tonelaje planificado en el mismo periodo, lo que permite calcular un tonelaje total en redundancia de 28.5Kt/mes. Consecuentemente, el sistema redundante de puntos de extracción está definido por $K=8$ y $N=11$ (número necesario y total de componentes, respectivamente). Un buen cuestionamiento es preguntarse por qué el sistema de puntos de extracción es limitante en el panel 12 y no en el panel 06, desde cuyos puntos de extracción deben extraerse alrededor de 157.9 Kt/mes (más del doble que el panel 12). La respuesta es que en el panel 06, el número total activo de puntos es $N=32$ y el tonelaje total en redundancia (de los puntos de extracción) es 83.7 Kt/mes, lo que entrega un total de $K=21$ componentes necesarias. Es decir en el panel 12

existen sólo N-K=3 componentes redundantes y en el panel 06 existen N-K=11, lo que explica el fenómeno.

El caso 4 (confiabilidad elevada y tonelaje planificado elevado) observado en los piques de traspaso LP01, LP02 y LP10 se explica al considerar el siguiente gráfico, que muestra como se comporta la confiabilidad del subsistema DP-PC por componentes, para cada pique de traspaso en cuestión:

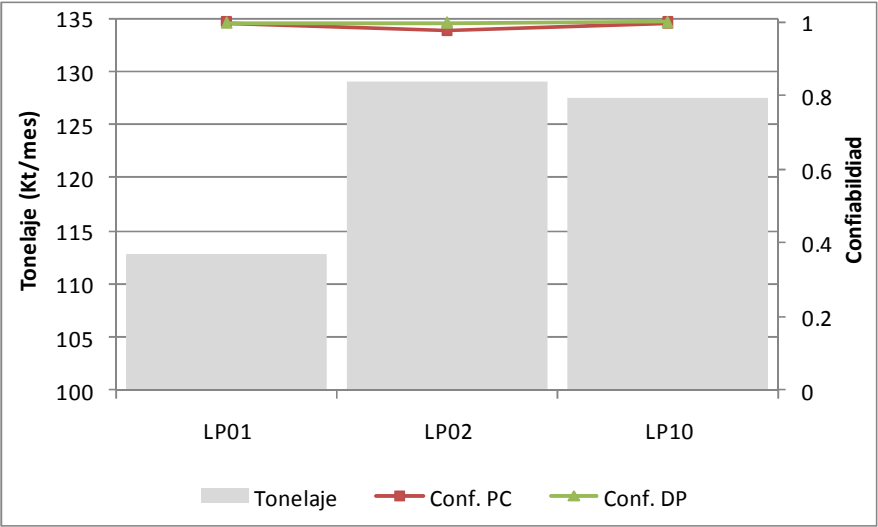


Figura 90. Composición de la confiabilidad del sistema DP-PC de paneles con confiabilidad elevada y tonelaje planificado elevado (caso 4), octubre 2008.

Primeramente, puede observarse que en ninguno de los casos anteriores el sistema de puntos de extracción es limitante, de acuerdo a los niveles de confiabilidad observados. La siguiente tabla muestra las redundancias en el sistema de puntos de extracción de los cruzados de producción asociados a los piques LP01, LP02 y LP10 (Paneles 01, 02 y 10 respectivamente):

Panel	Tonelaje planificado (Kt/mes)	Tonelaje nominal puntos de extracción (Kt/mes)	Tonelaje en redundancia puntos de extracción (Kt/mes)	N	K	N-K
Panel_01	112,732.5	137,763.2	25,030.7	22	18	4
Panel_02	128,965.3	159,752.1	30,786.8	25	20	5
Panel_10	127,445.5	197,289.6	69,844.1	23	15	8

Tabla 10. Detalle del tonelaje en redundancia de los paneles 01, 02 y 10.

En este caso, si bien la redundancia observada no es tan elevada como en el caso del Panel 06, el número elevado de puntos de extracción permite que el tonelaje planificado para cada componente no sea demasiado elevado, por lo que se le asocia en general una confiabilidad elevada. La siguiente tabla muestra las estadísticas básicas de los registros de confiabilidad de los puntos de extracción de cada panel:

Panel	Registros	Mín.	Máx.	Media	Desv. Est.
Panel_01	22	0.907	0.999	0.961	0.020
Panel_02	25	0.887	0.999	0.959	0.026
Panel_10	23	0.828	0.987	0.946	0.045

Tabla 11. Estadísticas básicas de los registros de confiabilidad de los puntos de extracción de los paneles 01, 02 y 10.

Puede observarse en la tabla anterior que los valores de confiabilidad de los puntos de extracción son siempre elevados (mayores al 80%) lo que se traduce en que la redundancia (N-K) del subsistema de puntos de extracción de cada panel sea suficiente para alcanzar una probabilidad de cumplimiento elevada.

El desarrollo presentado en párrafos anteriores muestra la capacidad del modelo de confiabilidad propuesto de identificar cuellos de botella en el flujo de mineral a través del sistema minero, sin embargo, un problema completamente diferente es hacer alcanzar al sistema a un valor de confiabilidad determinado. Para lo anterior existen al menos las siguientes alternativas:

1. Reducir los requerimientos productivos totales de la mina para posteriormente quitar carga productiva a aquellas componentes con confiabilidad reducida.

2. Disminuir la carga productiva en aquellas componentes con confiabilidad reducida y redistribuir el diferencial de tonelaje aprovechando las redundancias en otras componentes menos saturadas, manteniendo los requerimientos productivos totales.
3. Modificar el programa de preparaciones de manera de contar con mayor cantidad de infraestructura disponible para la producción y redistribuir cierta proporción del tonelaje de aquellas componentes de menor confiabilidad en esta nueva infraestructura.

Cualquiera sea el caso, debe tenerse en consideración que el modelo de confiabilidad propuesto da cuenta únicamente de las capacidades productivas del sistema minero y no del comportamiento geotécnico del macizo rocoso ni de las leyes del material movilizado. Lo anterior toma relevancia al considerar que cualquier redistribución del tonelaje al interior del sistema minero impactará, en mayor o menor grado al menos en los siguientes aspectos:

- Distribución de esfuerzos: puntos de extracción con poco movimiento pueden generar compactación del material quebrado y transmisión de carga al nivel de producción. Puntos de extracción con movimiento aislado pueden generar compactación del material de puntos adyacentes por fricción teniendo el mismo efecto anterior.
- Comportamiento de la dilución: aumentar la velocidad de extracción de un punto de extracción por redistribuciones de tonelaje puede afectar el punto de entrada de la dilución y el comportamiento de ésta en el tiempo.
- Producción de fino: la concentración de metal en el tonelaje movilizado puede verse afectada con la redistribución, al ingresar mineral al sistema desde sectores con leyes diferentes.
- Costos: debido a que la redistribución del tonelaje al interior del sistema minero afecta directamente en las distancias de transporte requeridas para cumplir el programa de producción.

Por lo expresado anteriormente, se enfatiza que el modelo de confiabilidad propuesto cuantifica únicamente las capacidades productivas (en términos de tonelaje) del sistema minero tomando en consideración que existen eventos de interferencia en sus diferentes

componentes, por lo que cualquier modificación del flujo planificado de tonelaje a través del sistema minero basado en el modelo de confiabilidad debe reevaluarse desde el punto de vista geotécnico, de la producción de finos y de cualquier otra variable relevante en la construcción de un programa de producción, ya sea desde un punto de vista técnico o económico. Lo expresado anteriormente puede resumirse en que la confiabilidad entregada por este modelo no es en ningún caso un indicador que permita evaluar un programa de producción en forma independiente, o sea, el valor de confiabilidad debe acompañarse de otros indicadores que permitan una evaluación técnico-financiera apropiada del programa productivo.

6 Experimentos genéricos y análisis de resultados

6.1 Componentes adicionales en la confiabilidad del sistema minero

Sin lugar a dudas, como se vio en el capítulo 2, existen numerosas alternativas para resolver el problema del manejo de materiales al interior de un sistema minero. Cualquiera sea el diseño propuesto para dar la solución a este problema, la arquitectura resultante del sistema minero es relevante en la probabilidad de cumplimiento de un programa de producción dado, debido a que este indicador es función de la infraestructura disponible en cada periodo.

Desde un punto de vista funcional, el objetivo del sistema productivo minero consiste únicamente en entregar toneladas a la planta de procesamiento, lo que permite inferir que mientras más simple es la arquitectura que permite movilizar el tonelaje desde un punto de extracción hasta el chancador, mayor es la probabilidad de cumplir con un programa productivo dado, pues puede considerarse que cada componente adicional en el sistema es una cuello de botella potencial.

Sin embargo, si se considera una mina virtual conformada por un único punto de extracción y el túnel de producción que permite su acceso, naturalmente las capacidades de este “sistema minero” son bastante limitadas, pues no pueden excederse las capacidades nominales de dicho punto de extracción. Es decir, la idea de integrar un mayor número de componentes en el sistema permite, hasta cierto punto, incrementar las capacidades del mismo, para un nivel de confiabilidad dado, pues si se incrementa el número de puntos de extracción conectados a ese túnel de producción, naturalmente llegará el momento en que la limitante al flujo de mineral es el túnel y no los puntos de extracción, por lo que se hace lógico considerar un segundo cruzados de producción, si el objetivo es incrementar las capacidades productivas. Si se considera un sistema minero como el de la mina de diamantes Premier (mostrado en la revisión de antecedentes bibliográficos), la consideración de un túnel de transporte que conecte todos los cruzados de producción requeridos es lógica, dado que el incremento de cruzados de producción tiene asociado un incremento en la extensión en planta de las componentes de infraestructura consideradas, los equipos LHD ya no son tan eficientes en el transporte y

por tanto se considera necesaria la utilización de camiones. Naturalmente, la productividad del sistema de camiones está relacionada con el ciclo de productivo de los equipos LHD que los cargan directamente, por lo que tarde o temprano, si se desea incrementar las capacidades productivas del sistema es necesario independizar el ciclo productivo de ambos equipos, por lo que se hace natural la utilización de piques, que poseen una determinada capacidad de almacenamiento, que permite desligar hasta cierto punto el funcionamiento de ambos equipos y con ello, aumentar las capacidades productivas. Algo similar ocurrirá si se consideran uno o más túneles de transporte, pues llega un determinado momento, dadas las restricciones espaciales intrínsecas a una mina subterránea, en que los camiones que recorren un mismo loop comienzan a estorbarse unos a otros. Si se considera ahora, que cualquier componente está sujeta a la ocurrencia de eventos de interferencia, la incorporación de componentes redundantes parece la opción más adecuada para asegurar un cierto nivel productivo.

Considerando el caso en estudio, resulta interesante entonces el impacto que tiene la consideración de 1 o 2 piques por cruzado de producción, considerando la geometría en planta en el nivel de producción. Dicho análisis se presenta a continuación.

1 versus 2 piques de traspaso por cruzado de producción

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de la confiabilidad conforme aumenta el tonelaje planificado en un cruzado de producción con 1 y 2 piques de traspaso:

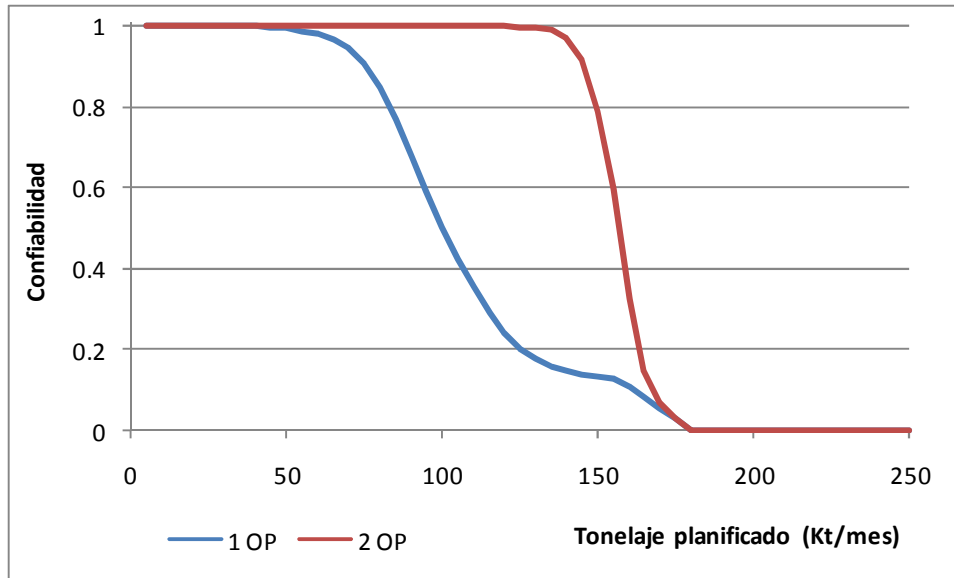


Figura 91. Confiabilidad versus tonelaje planificado para un cruzado de producción con 1 y 2 piques de traspaso.

Para la construcción del gráfico anterior se consideró, para cada cruzado de producción, un total de 20 puntos de extracción. Además, el valor de confiabilidad mostrado está medido a la salida del pique de traspaso, considerando todas las componentes aguas arriba (puntos de extracción y túnel de producción). La primera observación relevante es que el tonelaje máximo a extraer con un 100% de confiabilidad aumenta de 50Kt/mes (un pique de traspaso por cruzado de producción) a 130Kt/mes (2 piques de traspaso por cruzado de producción).

Si se analiza el gráfico anterior desde el punto de vista de que es necesario extraer del cruzado de producción, por ejemplo, 150Kt/mes, el primer caso ofrece una confiabilidad de 13.5%, mientras que la segunda configuración alcanza una confiabilidad de 78.7%, lo que muestra un aumento sustancial en la probabilidad de cumplimiento del plan de producción de dicho cruzado. Por sobre las 170Kt/mes por cruzado de producción, las diferencias entre ambos casos no son relevantes desde el punto de vista de su confiabilidad. En el primer caso, la confiabilidad del túnel de producción alcanza sólo el 2.3% y la del pique de traspaso asociado cercana a 0%, siendo entonces ambas componentes un cuello de botella para el sistema, mientras que en el segundo caso, el único cuello de botella es el túnel de producción, con una confiabilidad de 2.3%, pues cada pique tiene una confiabilidad de 92.5%. De cualquier manera, dada la conexión en

serie entre el sistema de puntos de extracción, el túnel de producción y pique de traspaso, el hecho que la confiabilidad de sólo una o todas las componentes consideradas sea reducida es indiferente para la confiabilidad de todo el sistema, lo que explica las similitudes entre ambos casos cuando las confiabilidades son inferiores al 5%.

De cualquier forma, es importante considerar el impacto que las configuraciones analizadas anteriormente tienen en las componentes de infraestructura aguas abajo del sistema, en este caso, los túneles de producción, pues como se mostró convenientemente en capítulos anteriores, la utilización de componentes adicionales sin una adecuada distribución de flujo en ellas, podría traducirse en disminuir la confiabilidad del programa en lugar de aumentarla.

6.2 Programa de preparaciones

El programa de preparaciones de una mina subterránea de hundimiento por paneles detalla qué áreas productivas se construyen en cada periodo del programa. Dada la naturaleza secuencial de una explotación mediante hundimiento por paneles, en que diversas zonas productivas entran en producción mientras que otras son cerradas, el programa de preparaciones generalmente se extiende durante gran parte de la vida productiva del sistema minero. El hecho anterior genera que la infraestructura minera disponible evolucione constantemente en el tiempo, por lo que el perfil de flujo de mineral a través de la infraestructura es dinámico. Dado que diferentes componentes poseen características productivas diferentes (aunque sean componentes del mismo tipo) se deduce que el programa de preparaciones tiene directa relación en la productividad del sistema minero. Esta dependencia se traduce en el hecho que diferentes programas de preparaciones impacten de diferente forma en la confiabilidad del programa de producción asociado.

Mediante el análisis de casos potencialmente factibles, el modelo de confiabilidad permite medir el impacto que el programa de preparaciones tiene en el programa de producción. Por ejemplo, considérese el siguiente diagrama:

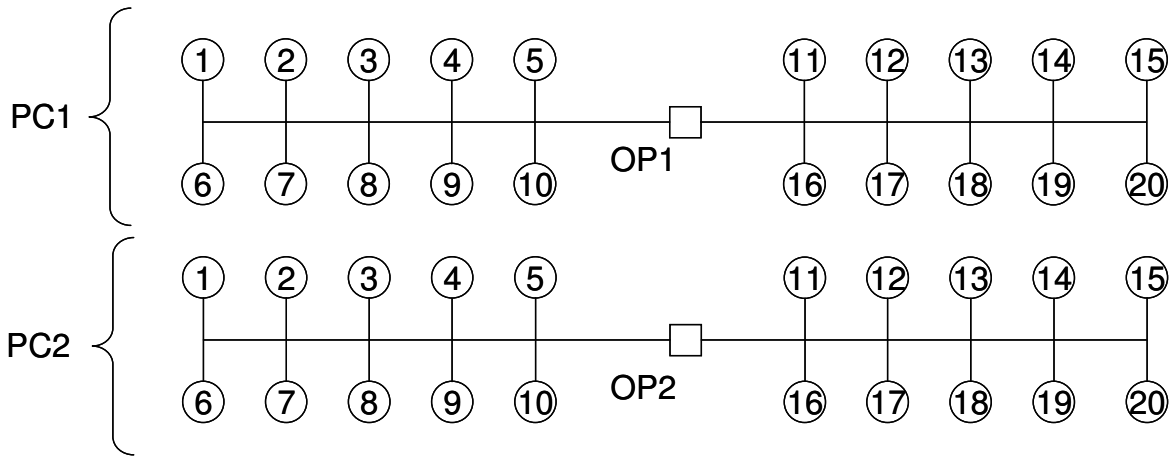


Figura 92. Diagrama de relaciones de conectividad. 2 cruzaos de producción, cada uno con 1 pique de traspaso y 20 puntos de extracción.

El diagrama anterior esquematiza el diseño de 2 cruzaos de producción contiguos en el nivel de producción, cada uno compuesto por 20 puntos de extracción y 1 pique de traspaso. Supóngase que la velocidad de preparación de área es tal que permite abrir 10 puntos de extracción por mes (del orden de 20,300 m²/año, para una malla de extracción de 13x13m²). Considérense ahora los siguientes programas de preparaciones:

Programa de preparaciones 1					
Panel	Puntos de extracción	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
PC1	1 al 10	1	1	1	1
PC1	11 al 20	0	1	1	1
PC2	1 al 10	0	0	1	1
PC2	11 al 20	0	0	0	1

Programa de preparaciones 2					
Panel	Puntos de extracción	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
PC1	1 al 10	1	1	1	1
PC1	11 al 20	0	0	1	1
PC2	1 al 10	0	1	1	1
PC2	11 al 20	0	0	0	1

Tabla 12. Programas de preparaciones 1 y 2.

Nótese que el total de puntos de extracción abiertos por periodo es el mismo en ambos casos. Las curvas U y PCC de cada componente son las mismas que las consideradas en

la validación del modelo de confiabilidad. El siguiente gráfico muestra la evolución de la confiabilidad de la conexión K out of N del sistema DP-PC-OP (no se considera cruzado de transporte para mayor entendimiento del resultado) por periodos conforme aumenta progresivamente el tonelaje planificado en las componentes disponibles, para ambos programas de preparación presentados anteriormente:

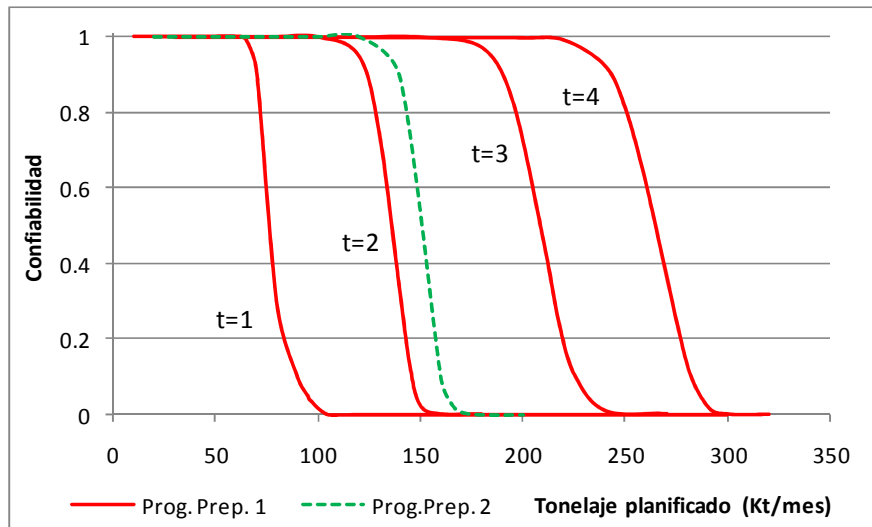


Figura 93. Confiabilidad versus tonelaje planificado por periodos para los programas de preparaciones 1 y 2.

Si bien en todos los periodos considerados la cantidad de puntos de extracción es la misma, en el periodo 2 se observa que el programa de preparaciones 2 permite incrementar la confiabilidad de un tonelaje planificado dado. Por ejemplo, cuando al sistema se le solicita un total de 140Kt/mes, el programa de preparaciones 1 tiene asociada una confiabilidad de 33.2% y el programa de preparaciones 2 tiene asociada una confiabilidad de 89.1%. Esta diferencia se produce por el hecho que si bien el total de puntos de extracción abiertos es el mismo en ambos casos, en el programa de preparaciones 2 éstos se encuentran distribuidos en 2 cruzados de producción, mientras que en el programa de preparaciones 1 en sólo uno. Lo anterior permite que el túnel de producción (en el caso 2) esté menos saturado, lo que aumenta su confiabilidad. En el periodo 1 las curvas de ambos programas son exactamente iguales debido a que la infraestructura productiva es la misma. Por su parte, en los periodos 3 y 4 la infraestructura disponible también es la misma, pero existen variaciones imperceptibles en gráfico que se deben fundamentalmente a diferencias en la madurez de las componentes.

Más allá del resultado numérico del ejercicio anterior, se desprende que el programa de preparaciones impacta en las capacidades productivas del sistema minero, por lo que ambos están relacionados no sólo desde el punto de vista de sus dependencias (pues obviamente no se puede extraer tonelaje de una componente no construida) si no además por la productividad que puede alcanzar el sistema minero para un nivel de confiabilidad dado.

Simulación: retraso en la construcción de un pique

Un escenario potencialmente factible es el retraso en la construcción de un pique de traspaso, hecho que impacta directamente en la infraestructura total disponible en aquellos periodos en que la componente en cuestión no esté construida. Según el programa de preparaciones, a partir de septiembre del 2008, el panel 04 cuenta con dos piques de traspaso: LP04 y LP04S, conectados a los cruzados de transporte HC2 y HC3 respectivamente. Considérese que por algún motivo la construcción del pique LP04S se retrasa 3 meses, es decir, en vez de estar disponible para la producción desde el mes de septiembre, lo estará en el mes de diciembre del año 2008. El siguiente gráfico muestra la confiabilidad de ambos escenarios:

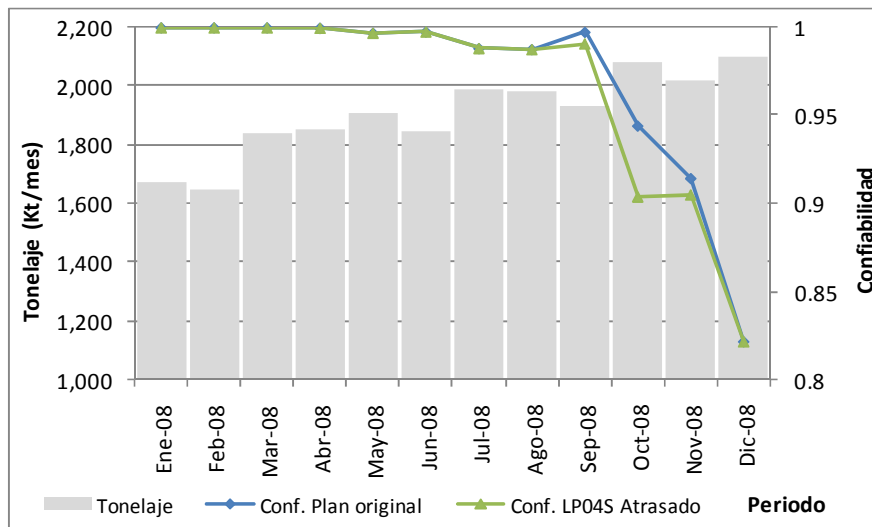


Figura 94. Simulación: retraso en la construcción del pique LP04S.

Puede observarse que en aquellos periodos en que la infraestructura disponible es diferente (sep-08, oct-08 y nov-08) la confiabilidad del escenario que considera un único

pique de traspaso para el panel 04 es menor que el caso base. Naturalmente, en el mes de diciembre, cuando ambos casos cuentan con la misma infraestructura disponible, la confiabilidad es similar (existen diferencias imperceptibles en el gráfico por la diferencia de madurez en las componentes).

Por otro lado, el retraso en la construcción del pique LP04S no sólo impacta en el hecho de la infraestructura disponible si no que además genera la necesidad de redistribuir el tonelaje al interior del sistema minero, debido a que el tonelaje que originalmente fue planificado de extraer a través del pique LP04S debe asignarse al pique LP04, situado en el mismo cruzado de producción. Por otro lado, los cruzados de transporte situados aguas abajo también se ven afectados: el cruzado HC2 debe movilizar el tonelaje extra asignado al LP04, lo que produce una disminución de la confiabilidad de dicha componente, mientras que el cruzado HC3, debido a que reduce su carga productiva por la no disponibilidad del pique LP04S, tiende a aumentar su confiabilidad.

6.3 Diseño minero asistido por modelo de confiabilidad

Un aspecto particularmente relevante en el diseño de minas de hundimiento por bloques o paneles es el cálculo de la distancia de separación entre piques de traspaso en un cruzado de producción. Como se ha mostrado en secciones previas, la infraestructura disponible tiene un impacto directo en la confiabilidad de los programas productivos que consideran la utilización de dicha infraestructura para su ejecución.

Para analizar las interrelaciones entre el programa de producción y la infraestructura total disponible (diseño minero), puntualmente en lo referido al número de piques de traspaso por cruzado de producción, se calculó la confiabilidad de diversos programas productivos, cambiando cada vez el valor de las siguientes variables:

- Tonelaje planificado por cruzado de producción. Variando desde 5,000t/mes a 250,000t/mes, con incrementos de 5,000t/mes.
- Número total de piques de traspaso disponibles por cruzado de producción. Variando de 1 a 5 piques de traspaso, con incrementos de 1 pique de traspaso.

- Número total de puntos de extracción por cruzado de producción. Variando de 5 a 30 puntos de extracción, con incrementos de 5 puntos de extracción.

Para cada escenario, el tonelaje planificado total por cruzado de producción fue dividido en partes iguales entre los puntos de extracción disponibles para obtener el tonelaje planificado por punto de extracción. Se consideró la misma subdivisión en partes iguales para calcular el tonelaje planificado de cada pique de traspaso. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 95. Naturalmente, los resultados mostrados dicho gráfico están asociados a los parámetros con que se ejecutaron los experimentos en el modelo de confiabilidad (curvas U y PCC), sin embargo permiten esquematizar de buena forma como las capacidades productivas del sistema minero, considerando la ocurrencia de interferencias operacionales están relacionadas con la infraestructura disponible.

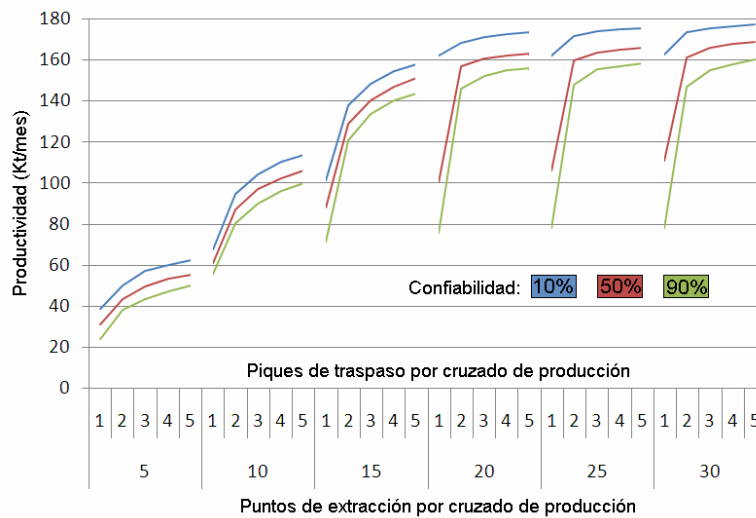


Figura 95. Productividad del cruzado en función de la infraestructura disponible.

La Figura 95 permite cuantificar la relación entre el diseño minero de un cruzado de producción y el programa productivo con un enfoque probabilístico. Para cada combinación de piques de traspaso y puntos de extracción en el cruzado, puede

observarse que un incremento en los requerimientos productivos implica una reducción en la probabilidad de cumplimiento del tonelaje planificado.

Sin embargo lo anterior, es importante notar que cuando el número de puntos de extracción es reducido, las diferencias en productividad son menos importantes, para cualquier número de piques de traspaso. Este comportamiento puede explicarse considerando el balance entre el tonelaje que entra y sale del sistema. Debido a que el número de puntos de extracción es reducido, el tonelaje que puede introducirse al sistema está acotado a un valor también reducido, sin importar el número de piques de traspaso, es decir, existe un cuello de botella a nivel de puntos de extracción, por lo que el número total de piques de traspaso es menos relevante. Naturalmente, si el número de puntos de extracción aumenta, la productividad también aumenta, para un nivel de contabilidad dado.

Cuando el número de puntos de extracción es elevado, los piques de traspaso pasan a ser el cuello de botella, los incrementos en productividad por pasar de 1 a 2 piques de traspaso son del orden del 85%, para 20 puntos de extracción y superiores. Sin embargo, pasar de 2 a 3 piques de traspaso por cruzado de producción significa un incremento de sólo un 6% en productividad, pues la limitante al flujo de mineral al interior del cruzado pasa a ser el túnel de producción.

Ubicación de piques de traspaso

En el nivel de producción, la longitud total de los cruzados de producción está confinada por la geometría de la envolvente económica de puntos de extracción. En algunos casos, el largo total de un cruzado de producción está fuertemente restringido por geometrías angostas de la envolvente, como se observa en el lado Este del sector DOZ (Figura 96). En estos casos, puede considerarse que el número total de puntos de extracción por cruzado de producción es fijo para el diseño, siendo el total de piques de traspaso la única variable de diseño.

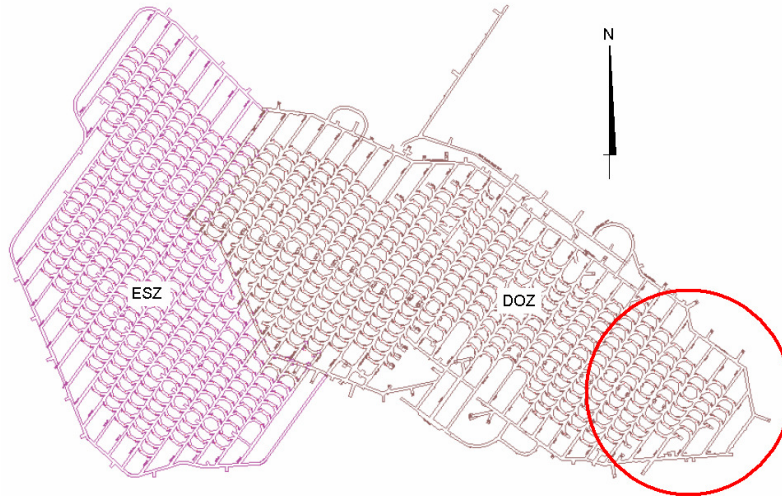


Figura 96. Nivel de producción sectores DOZ/ESZ.

Por otro lado, cuando la longitud del cruzado de producción es suficientemente larga, es decir, que eventualmente un cruzado de producción podría dividirse en 2 o más cruzados independientes (sector ESZ). En la Figura 95 puede observarse que para cualquier confiabilidad, no existen mayores diferencias en productividad cuando el número de puntos de extracción por cruzado de producción es 20 o más, sin importar el número de piques de traspaso. Así, cuando el número máximo de puntos de extracción que un cruzado puede contener es mayor que 20, es recomendable analizar la eventual división de dicho cruzado en dos o más unidades independientes, de manera de aprovechar las ventajas productivas.

Cuando se conoce el número de piques de puntos de extracción y piques de traspaso en un determinado cruzado de producción, puede considerarse la siguiente fórmula para calcular la distancia de separación entre piques de traspaso que debe considerarse para satisfacer los requerimientos productivos al nivel de confiabilidad deseado:

$$d_{OP} = \frac{\left(\frac{N^{DP}}{2}\right) - 1}{N^{OP} + 1} \cdot d$$

Donde:

- d_{OP} es la distancia entre piques de traspaso.

- N^{DP} es el número de puntos de extracción en el cruzado de producción.
- N^{OP} es el número de piques de traspaso en el cruzado de producción.
- d es la longitud del pilar menor.

Por ejemplo, considérese un cruzado de producción con 30 puntos de extracción y 2 piques de traspaso (suficientes para satisfacer un total de 145Kt/mes a un nivel de confiabilidad del 90%), donde la longitud del pilar menor es d , con lo que la fórmula anterior toma la siguiente forma:

$$d_{OP} = \frac{\left(\frac{30}{2}\right)^{-1}}{2+1} \cdot d = 4.6 \cdot d$$

Así, el primer pique de traspaso está ubicado a $4.6 \cdot d$ desde el primer punto de extracción del cruzado, y el segundo pique de traspaso está ubicado a $4.6 \cdot d$ desde el pique de traspaso anterior, de acuerdo al siguiente diagrama:

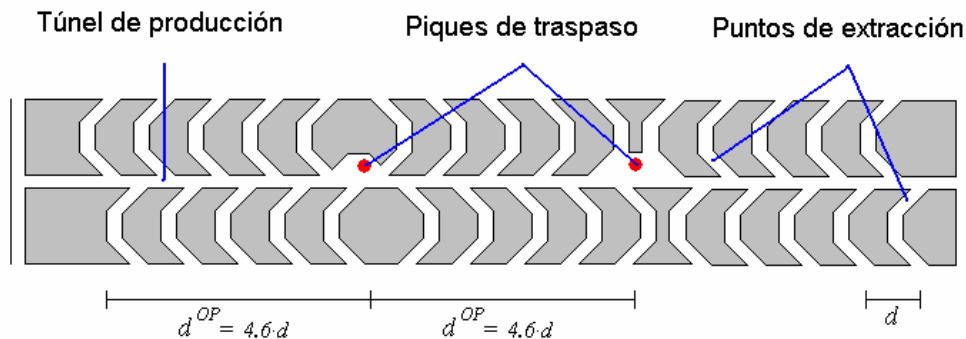


Figura 97. Ubicación de piques de traspaso en el cruzado de producción.

El parámetro d_{OP} debe entenderse como una guía para la ubicación de piques de traspaso en el cruzado de producción y no como una regla estricta, es decir que d_{OP} puede modificarse parcialmente con el fin de ajustarse a las restricciones geométricas de la malla de puntos de extracción.

7 Conclusiones y recomendaciones

La confiabilidad de cada periodo de un programa de producción es función, al menos, de las siguientes variables:

- Interferencias operacionales en sus diferentes componentes de infraestructura.
- Infraestructura productiva disponible en cada periodo del programa y su madurez.
- Relaciones de conectividad de infraestructura (diseño minero).
- Distribución de flujo de tonelaje en las componentes de infraestructura disponible.

El diseño minero y el programa de desarrollos de una mina subterránea de panel caving afectan directamente en la probabilidad de cumplimiento de un programa de producción dado. Es decir, la productividad asociada a un programa de producción, para un nivel de confiabilidad dado es función de cómo se conectan las diferentes componentes del sistema y cómo estas se construyen en el tiempo. Por lo anterior, en un sistema minero complejo, donde la cantidad y tipo de componentes son elevados, el sistema de manejo de materiales, aguas abajo de los puntos de extracción, es potencialmente el cuello de botella más relevante en el flujo de mineral hasta la planta de procesamiento.

Por su parte, la forma en que se distribuye el mineral al interior del sistema minero para movilizarlo a la planta de procesamiento afecta en la confiabilidad del programa de producción. Considerando lo anterior, se desprende que aumentar la confiabilidad de un programa de producción dado no depende exclusivamente del incremento de la infraestructura productiva disponible en cada periodo, debido a que la forma en que se utiliza esta infraestructura para extraer el mineral y transportarlo a la planta de procesamiento también impacta en la probabilidad de cumplimiento de un programa productivo dado.

En este sentido, se recomienda que en el proceso de planificación de producción se cuantifique, además de la cantidad total de material a movilizar en cada periodo, como se debe distribuir el flujo de tonelaje a través de las diversas componentes del sistema, de manera de incrementar la probabilidad de lograr los objetivos productivos propuestos por el plan de producción, dado que el tonelaje máximo capaz de moverse por el sistema

minero para un nivel de confiabilidad dado es función de esta distribución de flujo en la infraestructura productiva disponible.

Por otro lado, se observa que los resultados del modelo de confiabilidad propuesto son fuertemente dependientes de los parámetros con que se alimenta (particularmente de las curvas de producción característica de diferentes componentes), por lo que se recomienda utilizar la confiabilidad como un indicador de comparación entre escenarios más que como un número absoluto, debido a que la confiabilidad de los resultados del modelo de confiabilidad se hace dependiente de la calidad de la información con que dichos parámetros son estimados.

Finalmente, considerando que el modelo de confiabilidad de programas de producción propuesto considera únicamente las capacidades productivas de la infraestructura y no otras restricciones inherentes a la minería de hundimiento, se recomienda utilizar los resultados del modelo como un apoyo al proceso de programación de producción y no como un indicador aislado, dado que los parámetros considerados asumen la existencia de otros sistemas que también poseen su confiabilidad propia y que se relacionan con los considerados en el modelo propuesto, como la infraestructura de ventilación y los niveles de hundimiento.

7.1 Trabajo futuro

- Incorporar otros niveles de infraestructura asociada a la producción de una mina subterránea: Nivel de hundimiento, nivel de ventilación.
- Incorporar otras fuentes de incertidumbre como la distribución de leyes en el yacimiento y la disponibilidad de equipos e insumos en general.
- Generar modelos de confiabilidad para otros métodos de explotación.
- Integración del indicador confiabilidad como una restricción o directamente en la función objetivo de un modelo de programación matemática que permita calcular un programa de producción.
- Análisis de riesgo financiero en función de la confiabilidad de un programa de producción.

8 Bibliografía

1. AGUAYO, A. et Al. LHD versus mechanized grizzly in III Panel of Andina. En: MassMin 2004, pp. 415-420.
2. ATWOOD, C. Parametric estimation of time-dependant failure rates for probabilistic risk assessment. En: Reliability Engineering and system safety, 1992, pp.181-194.
3. BARTLETT, P. J., CROLL, A. Cave mining at Premier diamond mine. En: MassMin 2000, pp. 227-234.
4. BOLAND, P. y PROSHCAN, F. The reliability of K out of N systems – The annals of probability. Vol. 11, 1983, pp. 760-764.
5. BROWN, E T. Block Caving Geomechanics. JKMRRC Monograph Series on Mining and Mineral Processing. Julius Kruttschnitt Mineral Centre, University of Queensland: Brisbane. Vol 3, 2003.
6. CALDER, K., TOWNSEND, P., RUSSELL, F. The Palabora underground mine project. En: MassMin 2000, pp. 219-225.
7. CASTEN, T. et Al. P.T. Freeport Indonesia's Deep Ore Zone mine – expanding to 80,000 tonnes per day. En: MassMin 2008, pp. 265-274.
8. KAZAKIDIS, V. y SCOBLE, M. Accounting for ground-related Problems in planning mine production systems. Mineral Resources Engineering, Imperial College Press. Londres, Inglaterra, Vol. 11, N 1, 2002.
9. KESKIMANI, K. et Al. Henderson's new 7210 production level. En: MassMin 2004, pp. 397-403.
10. KUO, W. y ZUO, M. Optimal reliability modeling: principles and applications. Canadá, John Wiley, 2002.
11. LAKNER, A., y ANDERSON, R. Reliability engineering for nuclear and other high technology systems. Elsevier Applied Science, Londres, 1985.
12. LAUBSCHER, D. Cave mining - The state of the art. Journal of the South African Institute of Mining Metallurgy, Vol. 94, 1994, pp. 279-292.
13. PASCOE, E., ODDIE, M. y EDGAR, I. Panel caving at the Resolution copper project. En: MassMin 2008, pp. 35-42.
14. PASCUAL, R. El arte de mantener. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2005.
15. RAUSAND, M. y HOYLAND, A. System reliability theory, models, statistical methods and applications. Segunda edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2004.

16. RIGDON, S. y BASU, A. Statistical methods for the reliability of repairable systems. Primera edición. Canadá, Wiley-Interscience, 2000.
17. RUBIO, E. Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning. Tesis (Ph. D.). Vancouver, Canadá. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering), 2006.
18. RUBIO, E. y DIERING, T. Block cave production planning using operations research Tools. En: MassMin 2004, pp. 141-149.
19. RUBIO, E., DUNBAR, S. y SCOBLE, M. Scheduling in block caving operations using operations research methods. En: Annual General Meeting, Can. Inst. Min & Metall. Montreal, Quebec, Canada, 2001.
20. RUSSEL, F. Application of a PC - Based network analysis program to mine scheduling. En: Apcom 1987.
21. SALAMANCA, F. Aplicación de la redundancia activa en la programación de producción de mina subterránea. Tesis (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.
22. SUMMERS, J., 2000. Analysis and management of mining risk. En: MassMin 2000, Brisbane. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
23. TRONCOSO, S. Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción. Tesis (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2006.
24. VESELY, W. Incorporating aging effects into probabilistic risk analysis using a Taylor expansion approach. En: Reliability Engineering and system safety, 1991, pp.315-337.

9 Anexos

9.1 Anexo A: Implementación VBA del algoritmo de resolución del sistema K out of N para componentes no idénticas

```
Public Function KoutofN(k, n, ri As Variant)
    Dim p(), q(), Re() As Double
    ReDim p(n), q(n), Re(n, n)
    For i = 1 To n
        p(i) = ri(i)
        q(i) = 1 - p(i)
    Next i
    Re(0, 0) = 1
    For i = 1 To n
        Re(i, 0) = 0
    Next i
    For i = 0 To n
        For j = 1 To n
            If i - 1 < 0 Or i = j + 1 Then
                Re(i, j) = q(j) * Re(i, j - 1)
            Else
                Re(i, j) = q(j) * Re(i, j - 1) + p(j) * Re(i - 1, j - 1)
            End If
        Next j
    Next i
    Rel = 0
    For i = k To n
        Rel = Rel + Re(i, n)
    Next i
    KoutofN = Rel
End Function
```

9.2 Anexo B: Parametrización de parámetros del modelo de confiabilidad

Curvas U

La curva U considerada para los puntos de extracción se muestra en la siguiente gráfica:

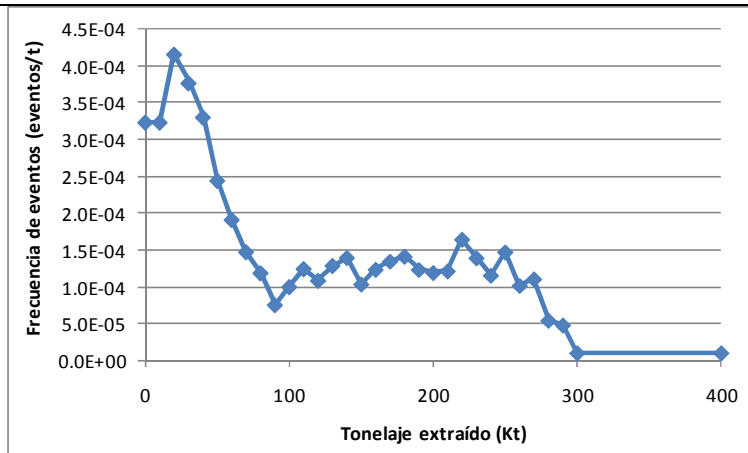


Figura 98. Curva U de puntos de extracción.

Tonelaje extraído (Kt)	Frecuencia de eventos (eventos/t)
0	3.24E-04
10	3.24E-04
20	4.16E-04
30	3.77E-04
40	3.31E-04
50	2.44E-04
60	1.91E-04
70	1.47E-04
80	1.19E-04
90	7.51E-05
100	9.97E-05
110	1.24E-04
120	1.08E-04
130	1.28E-04
140	1.39E-04
150	1.03E-04

Tabla 13. Parametrización de la curva U de puntos de extracción.

Tonelaje extraído (Kt)	Frecuencia de eventos (eventos/t)
160	1.23E-04
170	1.34E-04
180	1.41E-04
190	1.23E-04
200	1.19E-04
210	1.21E-04
220	1.64E-04
230	1.39E-04
240	1.15E-04
250	1.47E-04
260	1.01E-04
270	1.10E-04
280	5.38E-05
290	4.75E-05
300	9.51E-06
400	9.51E-06

Tabla 14. Parametrización de la curva U de puntos de extracción (continuación).

La curva U considerada para los piques de traspaso se muestra en la siguiente gráfica:

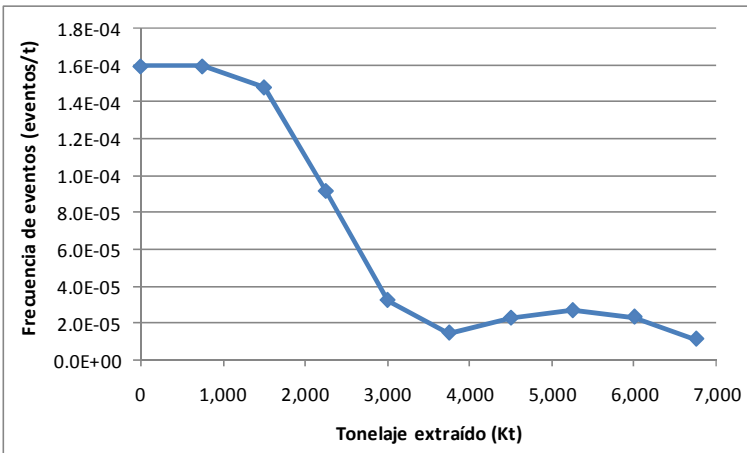


Figura 99. Curva U de piques de traspaso.

Tonelaje extraído (Kt)	Frecuencia de eventos (Eventos/t)
0	1.59E-04
750	1.59E-04
1,500	1.48E-04
2,250	9.16E-05
3,000	3.21E-05
3,750	1.44E-05
4,500	2.25E-05
5,250	2.66E-05
6,000	2.31E-05
6,750	1.10E-05

Tabla 15. Parametrización de curva U de piques de traspaso.

Curvas de producción característica

La curva de producción característica de los puntos de extracción considerada en la validación y los experimentos numéricos realizados se construyó en base a la información operacional recogida entre los periodos 2000 y 2006. De los registros anteriores se consideraron únicamente aquéllos valores que se encontraban sobre el percentil 80% de la distribución de valores de productividad asociada a cada número de eventos. Los registros utilizados se muestran en la siguiente gráfica:

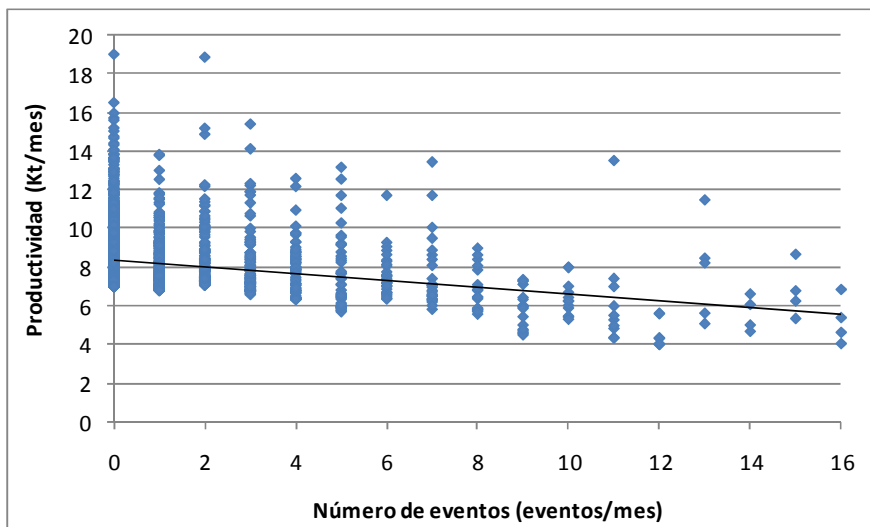


Figura 100. Curva de producción característica considerada para los puntos de extracción.

La media para cada número de eventos se cálculo a partir de la regresión lineal de todos los registros encontrados, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(N) = 175.87 \cdot N + 8,382.95$$

Donde:

- $\mu(N)$ es la productividad asociada al número de eventos N .
- N el número de eventos esperados por mes.

Para cada número de eventos, la curva de producción característica considera una distribución normal cuya media se calcula según la ecuación anterior. La desviación estándar de la curva de producción característica se consideró fija con el valor $\sigma = 1,576.88 \text{ t/mes}$, equivalente a la desviación estándar de la distribución de valores para 0 eventos por mes.

La curva de producción característica de los túneles de producción considerada en la validación y los experimentos numéricos realizados se construyó en base a la información operacional recogida entre los periodos 2000 y 2006, asociando la productividad de los puntos de extracción al túnel de producción que pertenecen. De los registros anteriores se consideraron únicamente aquéllos valores que se encontraban sobre el percentil 90% de la distribución de valores de productividad asociada a cada número de eventos. Los registros utilizados se muestran en la siguiente gráfica:

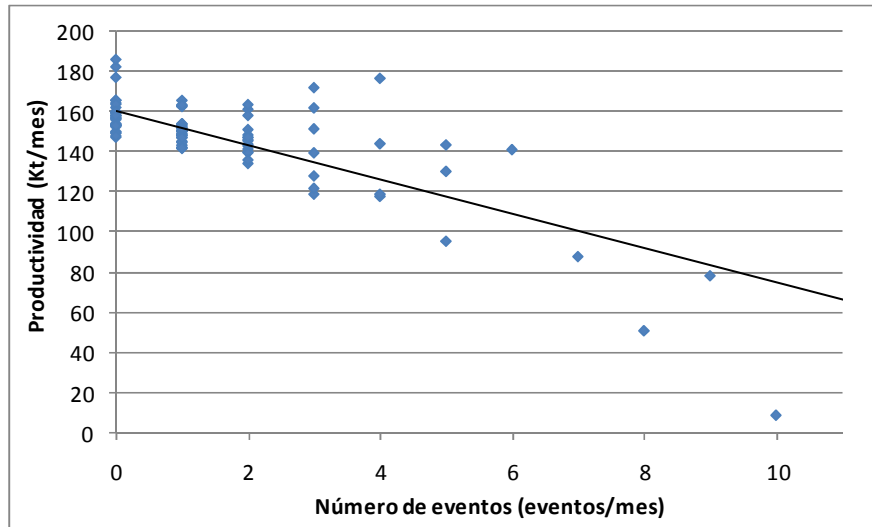


Figura 101. Curva de producción característica considerada para los túneles de producción.

La media para cada número de eventos se cálculo a partir de la regresión lineal de todos los registros encontrados, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(N) = 8,579.08 \cdot N + 160,731.85$$

Donde:

- $\mu(N)$ es la productividad asociada al número de eventos N .
- N el número de eventos esperados por mes.

Para cada número de eventos, la curva de producción característica considera una distribución normal cuya media se calcula según la ecuación anterior. La desviación estándar de la curva de producción característica se consideró fija con el valor $\sigma = 9,178.71 \text{ t/mes}$, equivalente a la desviación estándar de la distribución de valores para 0 eventos por mes.

La curva de producción característica de los piques de traspaso considerada en la validación y los experimentos numéricos realizados se construyó en base a la información operacional recogida en el periodo 2006. De los registros anteriores se consideraron únicamente aquéllos valores que se encontraban sobre el percentil 40% de la distribución

de valores de productividad asociada a cada número de eventos. Los registros utilizados se muestran en la siguiente gráfica:

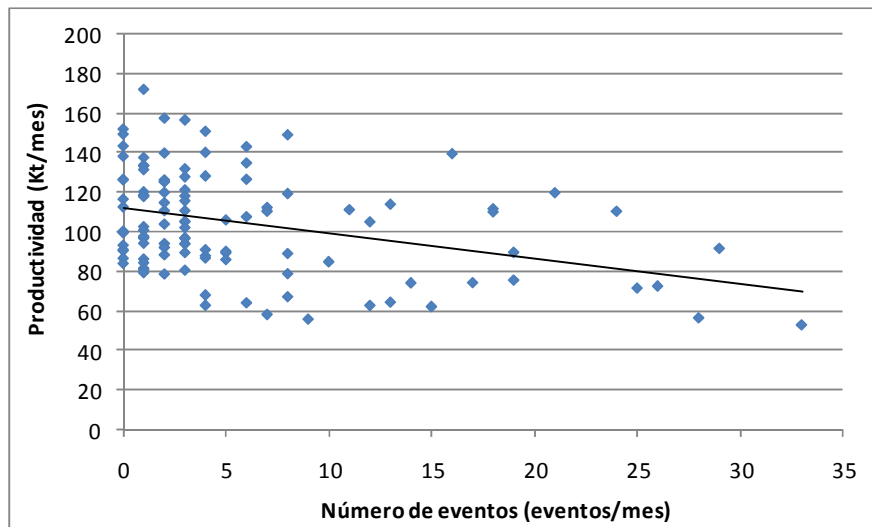


Figura 102. Curva de producción característica considerada para los piques de traspaso.

La media para cada número de eventos se cálculo a partir de la regresión lineal de todos los registros encontrados, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(N) = 1,281.50 \cdot N + 111,794.67$$

Donde:

- $\mu(N)$ es la productividad asociada al número de eventos N .
- N el número de eventos esperados por mes.

Para cada número de eventos, la curva de producción característica considera una distribución normal cuya media se calcula según la ecuación anterior. La desviación estándar de la curva de producción característica se consideró fija con el valor $\sigma = 23,483.36 \text{ t/mes}$, equivalente a la desviación estándar de la distribución de valores para 0 eventos por mes.

La curva de producción característica considerada para los túneles de producción es la mostrada en la siguiente figura:

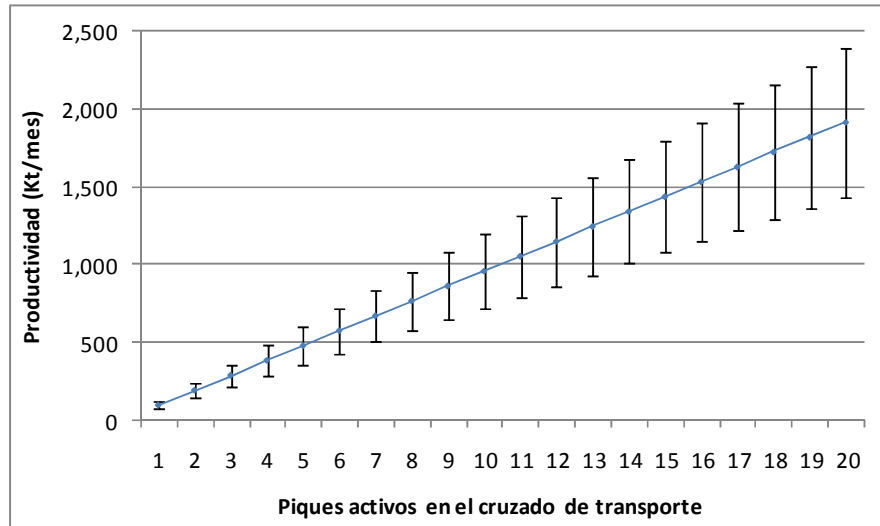


Figura 103. Curva de producción característica considerada para los túneles de transporte.

Para cada número de piques, la curva anterior considera una distribución normal cuya media y desviación estándar están dadas por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\mu(N) &= 95,383 \cdot N \\ \sigma(N) &= 7,500 \cdot N\end{aligned}$$

Donde:

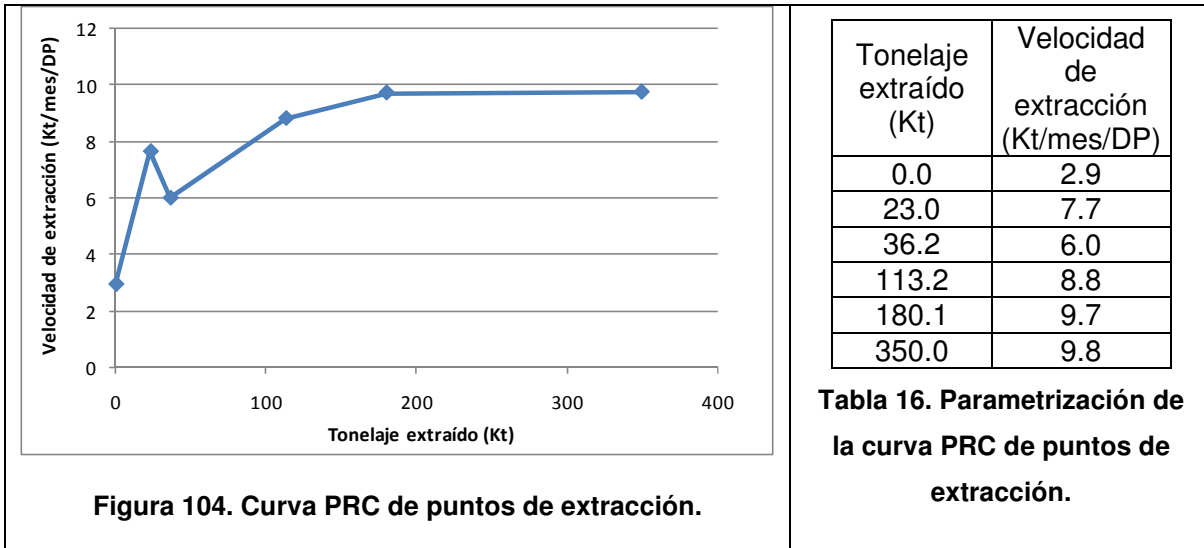
- $\mu(N)$: productividad media de la distribución de productividad para un total de N piques de traspaso.
- $\sigma(N)$: desviación estándar de la distribución de productividad para un total de N piques de traspaso.
- N : Piques de traspaso activos en el cruzado.

Los relaciones anteriores se basan en la regresión lineal de la media y desviación estándar (por separado), de los valores históricos de productividad para 8 piques de

traspaso por cruzado de transporte (Figura 56) y asumiendo que para $\mu(N=0)=0$ y $\sigma(N=0)=0$.

Tonelajes nominales

El siguiente gráfico muestra la curva PRC (Production Rate Curve) considerada para el cálculo del tonelaje nominal de los puntos de extracción:



La siguiente tabla muestra los tonelajes nominales considerados para otras componentes del modelo de confiabilidad:

Componente	Tonelaje nominal (Kt/mes)
Túnel de producción	180
Pique de traspaso	180
Túnel de transporte	1,400

Tabla 17. Tonelajes nominales considerados para diferentes componentes.