



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

EVALUACION DE LA INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA Y OPERACIONAL EN
PLANES MINEROS DE CORTO PLAZO EN FAENAS A CIELO ABIERTO

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

FABIÁN ALEJANDRO MANRÍQUEZ LEÓN

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN LUIS YARMUCH GÚZMAN
XAVIER EMERY
FERNANDO PEIRANO OPAZO

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN

La actividad minera está sujeta a distintos tipos de incertidumbre: mercado, geológica y operacional. Las incertidumbres antes mencionadas provocan diferencias entre los resultados del plan minero real y el plan esperado. La correcta evaluación del impacto de cada una de ellas en los resultados del plan minero podría permitir identificar las que mayor impacto tienen y tratar de gestionarlas mediante planes de acción. En este contexto, la presente investigación tiene por objetivo la evaluación del impacto de la incertidumbre geológica y operacional en los resultados del plan minero a corto plazo en una faena a cielo abierto.

Con respecto a la incertidumbre operacional, se identifican tres tipos: asociados a los parámetros operacionales, a los eventos operacionales y a la reasignación de componentes operacionales. La asociada a parámetros operacionales tiene relación con los tiempos, velocidades y capacidades de los componentes mineros. La asociada a eventos operacionales tiene que ver con los eventos de no disponibilidad y finalmente la asociada a la reasignación operacional tiene relación con la estrategia de operación ante cambios de no disponibilidad de componentes mineros.

Con respecto a la incertidumbre geológica, se desarrollan simulaciones condicionales de la ley de cobre total, cobre soluble y razón de solubilidad a partir de datos de pozos de tronadura, usando el método de bandas rotantes.

Para la evaluación de la incertidumbre, se toma un caso de estudio correspondiente a una faena minera a cielo abierto ubicada en el norte de Chile. El yacimiento explotado corresponde al del tipo pórfido cuprífero y actualmente se encuentra en la zona de mineral de óxidos de cobre. Para soportar la integración los tipos de incertidumbre operacional, se desarrolla y utiliza un modelo de simulación que emula la lógica de operación de un sistema de manejo de materiales de una faena minera a cielo abierto. Una vez que el modelo es satisfactoriamente verificado y validado contra datos reales, es usado para evaluar el impacto de estas dos fuentes de incertidumbre.

Se observa que, a partir del caso de estudio, la incertidumbre geológica asociada a las leyes de cobre total y cobre soluble en la alimentación a chancado no es significativa para un plan de movimiento de material fijo. Con respecto a la incertidumbre operacional asociada a los parámetros operacionales, se concluye que no hay diferencias significativas en los resultados del plan cuando se caracterizan por medio de medias o distribuciones de probabilidad. En cambio, la incertidumbre asociada a los eventos operacionales y a las reasignaciones operacionales es la que más impacta en los resultados del plan minero.

Como recomendaciones, se deben realizar esfuerzos para poder replicar en forma consistente la realidad de la operación minera para así obtener estimaciones más cercanas a su real desempeño.

ABSTRACT

Mining activity is subject to different types of uncertainty: market, geological and operational. These uncertainties lead to differences between the plan and its results. The correct evaluation of the impact of each on the results of the mining plan could allow identifying the largest impacts and try to manage them through action plans. In this context, this research aims at assessing the impact of geological and operational uncertainty in the results of short-term mine plan in an open pit mine.

With regard to the operational uncertainty, three types are identified: the one associated to operational parameters, that related to operational events and the uncertainty from reallocating operational components. The associated operational parameters are related to the times, speeds and capacities of mining components. The associated operational events have to do with the events of unavailability, and finally the associated operational reallocation is related to the operating strategy due to changes in mining unavailability of components.

With regard to the geological uncertainty, conditional simulations of the grade of total copper, soluble copper and solubility data from blasting holes develop using the turning bands method.

For the evaluation of uncertainty, a case corresponding to an open pit mining operation in northern Chile study is taken. The site operated corresponds to the copper porphyry and is currently in the copper oxide ore. Using data from this operation, a simulation model that emulates the logic of operating a material handling system of an open pit mining operation is developed. Once this model is successfully verified and validated against real data, it is used to assess the impact of the two uncertainty sources.

It is observed that, from the case study, the geological uncertainty associated with the grades of total copper and soluble copper in the feed to crushing is around 10% in terms of fine copper recovered.

With respect to operational uncertainty associated with the operational parameters it is concluded that there are no significant differences in the results of the plan when they are characterized by medium or probability distributions. However, the uncertainty associated with operational events and operational reallocations is the most impact on the results of the mining plan.

As recommendations, efforts should be made to consistently replicate the reality of the mining operation to get more close to their actual performance estimates.

A mis padres, Adolfo y Ximena.

AGRADECIMIENTOS

A mi padres Adolfo y Ximena. Ustedes son la razón de lo que soy. Los amo.

A mis hermanos Oscar y Valeria, por todo su cariño y paciencia conmigo.

A la chica que cambio mi vida en un segundo. Gracias Re.

A las mascotas de nuestra familia Lers y Watson.

A los grandes amigos que he conocido en mi paso por el colegio y universidad. Cada uno de ellos sabe quiénes son. Gracias por brindarme su amistad. Se les quiere mucho.

A mis profesores de matemáticas de enseñanza media Antonio Aedo y Rafael Arenas, por su excelente labor de enseñanza. Sin ellos, esto no hubiera sido posible.

A la Escuela de Verano de la Universidad de Chile, por haber despertado aún más mi interés hacia el área matemática durante mi enseñanza media, en particular al profesor Jorge San Martín.

A la Universidad de Chile, por haberme formado en el aspecto profesional, académico y humano.

A mi profesor guía Nelson Morales, por su confianza, paciencia y apoyo a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo.

A los profesores de mi comisión, Juan Luis Yarmuch, Xavier Emery y Fernando Peirano, por sus observaciones, correcciones, indicaciones y consejos para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros del laboratorio Delphos, por crear un excelente ambiente para la investigación, trabajo y recreo.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería de Minas por todos esos gratos momentos de convivencia.

A Codelco, por financiar totalmente la especialidad de la carrera de Ingeniería Civil de Minas mediante una beca de estudio.

A la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, por financiar totalmente el programa de Magíster en Minería mediante una beca de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Descripción del problema	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Alcances.....	5
1.4	Metodología.....	6
1.5	Organización del trabajo	7
2	Antecedentes	9
2.1	Planificación minera	9
2.2	Diferencia entre resultado planificado y real.....	10
2.3	Incertidumbre en minería	12
2.4	Incertidumbre geológica.....	13
2.5	Incertidumbre operacional.....	17
2.6	Algunas herramientas de evaluación de sistemas de manejo de materiales.....	19
2.7	Heurísticas de despacho de camiones	27
3	Descripción del modelo de simulación	33
3.1	Dinámica operacional de un sistema de manejo de materiales	33
3.2	Parámetros operacionales.....	35
3.3	Interpretación de la incertidumbre operacional en el modelo de simulación.....	36
3.4	Formulación del problema	42
3.5	Objetivo	43
3.6	Alcances.....	43
3.7	Límite de batería	43
3.8	Desarrollo modelo conceptual	43
4	Caso de estudio incertidumbre operacional	57
4.1	Descripción general del sistema de manejo de materiales.....	57
4.2	Descripción de experimentos	61
5	Resultados y análisis incertidumbre operacional	74
5.1	Verificación y validación del modelo de simulación.....	74

5.2	Obtención de distribuciones de parámetros operacionales.....	75
5.3	Evaluación productividad en función del número de camiones en circuitos productivos simples	79
5.4	Evaluación productividad en función de asignaciones de camiones a circuitos productivos.....	82
5.5	Impacto en producción ante sensibilidad de medias de parámetros operacionales	84
5.6	Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo modelos de ausencia de producción en equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales	90
5.7	Estudio de evaluación de sistema de manejo de materiales bajo sensibilidades en tiempo de producción de equipos de carga y transporte	101
5.8	Impacto producción frente a coberturas operacionales	103
6	Casos de estudio incertidumbre geológica.....	112
6.1	Descripción del caso de estudio.....	112
6.2	Experimentos asociados a la incertidumbre geológica	114
7	Resultados y análisis incertidumbre geológica	117
7.1	Comparación de características geológicas de polígonos de extracción mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales	117
7.2	Comparación de características geológicas sobre el plan base mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales	119
7.3	Evaluación de la incertidumbre geológica de polígonos de extracción	121
7.4	Evaluación de la incertidumbre geológica asociada al plan de corto plazo	128
8	Evaluación de la Incertidumbre Geológica y Operacional.....	131
9	Conclusiones.....	138
9.1	Conclusiones generales	138
9.2	Comentarios finales	139
10	Trabajo futuro	143
11	Bibliografía.....	145
12	Anexo A: Abstract Mineplanning 2015	149

13	Anexo B: Incertidumbre Operacional	150
13.1	Aplicación MVA a casos de estudio minero.....	150
13.2	Problema de asignación de camiones a circuitos productivos	160
13.3	Problema de asignación de equipos de carga a frentes de carga y camiones a circuitos productivos.....	162
13.4	Porcentaje de tiempo en producción para camiones	164
13.5	Porcentaje de tiempo en producción para equipos de carga	165
13.6	Análisis estadístico de las variables operacionales	166
13.7	Histogramas de distribuciones de parámetros operacionales.....	177
13.8	Especificación de parámetros de distribuciones	186
13.9	Calibración Turno 2014-04-21-D.....	189
13.10	Producción esperada y estadísticos de dispersión sobre escenarios de modelos de ausencia de operación de equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Producción Real vs Planificado.	10
Tabla 3-1: Descripción de parámetros operacionales.....	35
Tabla 4-1: Nombre y descripción de frentes de carga	58
Tabla 4-2: Caracterización de polígonos por volumen, área y masa.....	59
Tabla 4-3: Identificador y descripción de frentes de descarga	60
Tabla 4-4: Nombre y descripción de equipos de carga	60
Tabla 4-5: Nombre y descripción de equipos de carga	60
Tabla 4-6: Matriz de velocidades aisladas camión	61
Tabla 4-7: Relación entre experimentos y tipo de incertidumbre operacional a estudiar.....	62
Tabla 4-8: Circuitos productivos a a analizar.....	64
Tabla 4-9: Notación de estrategia de asignación de camiones a circuitos productivos.....	64
Tabla 4-10: Escenarios a estudiar.....	67
Tabla 5-1: Diferencia Caso Real vs Promedio 1000 réplicas.....	74
Tabla 5-2: Distribuciones de Probabilidad. Factor de carga	75
Tabla 5-3: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de carga	76
Tabla 5-4: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de acuatamiento en carga	77
Tabla 5-5: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de descarga	78
Tabla 5-6: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de acuatamiento en descarga	78
Tabla 5-7: Estadísticas Básicas para distintos tipos de Asignaciones Equipos de Transporte a Frentes de Carga.....	83
Tabla 5-8: Tabla Desviaciones Estándar Producción [kt/turno]. (ECvar)....	101
Tabla 6-1: Caracterización de polígonos por volumen, área y masa.....	114
Tabla 7-1: Caracterización de polígonos por leyes de cobre total, leyes de cobre soluble y solubilidad obtenidas por kriging y promedio de simulaciones	117
Tabla 7-2: Comparación de errores absolutos y relativos (máximos y promedios) para cobre total y cobre soluble calculados a por medio de kriging y simulaciones condicionales	121
Tabla 7-3: Estadísticas Básicas sobre Ley de Cobre Total para polígonos ..	121
Tabla 7-4: Estadísticas Básicas sobre Ley de Cobre Total para polígonos ..	123
Tabla 7-5: Estadísticas Básicas sobre Solubilidad para polígonos	125
Tabla 7-6: Estadísticas de fino de cobre total in situ [t] del plan de 5 días	132
Tabla 7-7: Estadísticas de fino de cobre soluble in situ [t] del plan de 5 días	133

Tabla 7-8: Estadísticas de movimiento de material para incertidumbre operacional.....	133
Tabla 7-9: Estadísticas de ley de cobre total y soluble para incertidumbre geológica.....	134
Tabla 12-1: Parámetros de definición de la red de cola. Ejemplo 1.....	150
Tabla 12-2: Parámetros de definición de la red de cola. Ejemplo 2.....	153
Tabla 12-3: % Tiempo en producción equipos de transporte.....	165
Tabla 12-4: Descripción de parámetros operacionales.....	166
Tabla 12-5: Estadísticas básicas Factor de Carga.....	167
Tabla 12-6: Estadísticas básicas Tiempo de Carga.....	168
Tabla 12-7: Estadísticas básicas Tiempo de Acuatamiento Carga.....	169
Tabla 12-8: Estadísticas básicas Tiempo de Descarga.....	170
Tabla 12-9: Estadísticas básicas Tiempo de Acuatamiento Descarga.....	171
Tabla 12-10: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2505 a Chancador.....	172
Tabla 12-11: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2520 a Chancador.....	172
Tabla 12-12: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2535 a Chancador.....	173
Tabla 12-13: Ruta Mina_F5_2520 Botadero Intermedio.....	173
Tabla 12-14: Ruta Mina_F5_2535 Botadero Intermedio.....	174
Tabla 12-15: Ruta Mina_F6_2595 Botadero Oeste.....	174
Tabla 12-16: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2505 a Stock 1.....	175
Tabla 12-17: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2520 a Stock 1.....	175
Tabla 12-18: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2535 a Stock 1.....	176
Tabla 12-19: Ruta Stock 01 a Chancador.....	176

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1: Ejemplo de Producción Real vs Planificado.	10
Gráfico 5-1: Comparación Movimiento Total Caso Real vs Promedio 1000 simulaciones	74
Gráfico 5-2: Producción vs Número de Camiones en circuito FCM3_PC8000_CH	79
Gráfico 5-3: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito FCM3_PC8000_CH	80
Gráfico 5-4: Producción vs Número de Camiones en circuito FCM2_PA02_CH	80
Gráfico 5-5: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito FCM2_PA02_CH	81
Gráfico 5-6: Producción vs Número de Camiones en circuito. ST1_CF02_CH	81
Gráfico 5-7: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito ST1_CF02_CH	82
Gráfico 5-8: Boxplot Producción a Chancador para distintas asignaciones Equipos de Transporte a Frentes de Carga	83
Gráfico 5-9: Rango absoluto y relativo a la producción media para cada estrategia de asignación de equipos de transporte	84
Gráfico 5-10: Sensibilidad Factor de Carga (ECDvar) 1000rep	85
Gráfico 5-11: Sensibilidad Factor de Carga (ECDTfijo)	85
Gráfico 5-12: Sensibilidad Tiempo de Carga (ECDTfijo)	86
Gráfico 5-13: Sensibilidad Tiempo de Carga (ECDTfijo)	86
Gráfico 5-14: Estadísticos de dispersión absolutos y relativos a la media. Sensibilidad tiempo de carga (ECfijo)	87
Gráfico 5-15: Desviación Estándar. Sensibilidad Tiempo de Carga	87
Gráfico 5-16: Sensibilidad Velocidad Media Aislada (ECDTfijo)	88
Gráfico 5-17: Sensibilidad Velocidad Media Aislada (ECDTfijo)	88
Gráfico 5-18: Desviación Estándar. Sensibilidad Velocidad Media Aislada. ...	89
Gráfico 5-19: Estadísticos de dispersión absolutos y relativos a la media. Sensibilidad tiempo de carga (ECfijo)	89
Gráfico 5-20: Comparación de producción bajo escenario Media_Var y Media_Fija.	90
Gráfico 5-21: Comparación de producción bajo escenario Distr_Var y Distr_Fija.	90

Gráfico 5-22: Comparación de producción bajo escenario Media_Var y Distr_Var.....	91
Gráfico 5-23: Comparación de producción bajo escenario Media_Fija y Distr_Fija.	91
Gráfico 5-24: Producción Media vs Escenario	93
Gráfico 5-25: Desviación Estándar Producción vs Escenario	93
Gráfico 5-26: IQR y RIC(95%) absolutos y relativos a la producción media vs escenarios	94
Gráfico 5-27: Boxplot de Producción vs Escenarios	94
Gráfico 5-28: Distribución Empírica vs Escenarios.....	95
Gráfico 5-29: Distribución Acumulada Empírica vs Escenarios	95
Gráfico 5-30: Producción Media vs Escenario	97
Gráfico 5-31: Desviación Estándar Producción vs Escenarios.....	98
Gráfico 5-32: IQR y RIC(95%) absolutos y relativos a la producción media vs escenarios	98
Gráfico 5-33: Diagrama de caja producción sobre escenarios	99
Gráfico 5-34: Distribución Acumulada Empírica vs Escenarios	99
Gráfico 5-35: Distribución Empírica vs Escenarios.....	100
Gráfico 5-36: Desviación Estándar Producción a Chancador para niveles de % Tiempo de Producción de ET y EC. Leyenda: % Tiempo de Producción EC. (ECvar)	102
Gráfico 5-37: Desviación Estándar Producción a Chancador para niveles de % Tiempo de Producción de ET y EC. Leyenda: % Tiempo de Producción ET. (ECvar)	102
Gráfico 5-38: Material Depositado bajo Inhabilitación descarga chancado. Opción Botadero.....	103
Gráfico 5-39: Material Depositado bajo Inhabilitación descarga chancado. Opción Stock.....	104
Gráfico 5-40: Material depositado bajo inhabilitación descarga chancado. Opción Stock Botadero	104
Gráfico 5-41: Comparación movimiento total material entre opciones	105
Gráfico 5-42: Caso base	107
Gráfico 5-43: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación PC8000	107
Gráfico 5-44: Producción total a chancado bajo escenario inhabilitación PC8000	108
Gráfico 5-45: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación PA02.....	108
Gráfico 5-46: Producción total a chancado bajo escenario inhabilitación PA02	109

Gráfico 5-47: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación CF02.....	109
Gráfico 5-48: Producción total a chancado bajo escenario de inhabilitación CF02.....	110
Gráfico 7-1: Comparación de CuT para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones.....	118
Gráfico 7-2: Comparación de CuS para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones.....	118
Gráfico 7-3: Comparación de sol para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones.....	118
Gráfico 7-4: Plan base de movimiento de mineral. Comparación de ley de cobre total y soluble entre kriging y promedio de simulaciones.....	119
Gráfico 7-5: Error Absoluto y Relativo de Ley de Cobre Total entre kriging y promedio de simulaciones	120
Gráfico 7-6: Error Absoluto y Relativo de Ley de Cobre Soluble entre kriging y promedio de simulaciones	120
Gráfico 7-7: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de la ley de cobre total sobre polígonos	122
Gráfico 7-8: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre total sobre polígonos	122
Gráfico 7-9: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre total sobre polígonos ordenados por ley de creciente.....	123
Gráfico 7-10: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos	124
Gráfico 7-11: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos	124
Gráfico 7-12: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos ordenados por ley creciente	125
Gráfico 7-13: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de solubilidad sobre polígonos	126
Gráfico 7-14: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de solubilidad sobre polígonos	126
Gráfico 7-15: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de solubilidad sobre polígonos ordenados por solubilidad creciente.....	127
Gráfico 7-16: Ley Media CuT vs Período. Confiabilidad 95%	129
Gráfico 7-17: Rango Ley CuT vs Período. Confiabilidad 95%	129
Gráfico 7-18: Ley Media de CuS vs Período. Confiabilidad 95%	130
Gráfico 7-19: Rango Ley Media de CuS vs Período. Confiabilidad 95%.....	130
Gráfico 7-20: Fino de cobre total in situ [t] del plan de 5 días	132
Gráfico 7-21: Fino de cobre soluble in situ [t] del plan de 5 días.....	133

Gráfico 12-1: Productividad de la red de cola en función del número de camiones. Ejemplo 1	151
Gráfico 12-2: Tiempos de espera. Ejemplo 1	151
Gráfico 12-3: Tiempos de ciclo. Ejemplo 1	152
Gráfico 12-4: Utilización frentes de carga y descarga. Ejemplo 1	152
Gráfico 12-5: Productividad total de la red de cola en función del número de camiones en circuitos A y B	154
Gráfico 12-6: Productividad del circuito A en función del número de camiones en circuitos A y B	155
Gráfico 12-7: Productividad del circuito B en función del número de camiones en circuitos A y B	155
Gráfico 12-8: Tiempos de ciclo. Circuito A.....	156
Gráfico 12-9: Tiempos de ciclo. Circuito B.....	156
Gráfico 12-10: Utilización Frente de Carga A en función del número de camiones en circuito A y B.....	157
Gráfico 12-11: Utilización Frente de carga A en función del número de camiones en circuito A y B.....	157
Gráfico 12-12: Utilización Frente de Descarga en función del número de camiones en circuito A y B.....	158
Gráfico 12-13: Cociente entre la producción lineal A y la producción A por MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B	159
Gráfico 12-14: Cociente entre la producción B lineal y la producción B por MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B	159
Gráfico 12-15: Cociente entre la producción total lineal y la producción total real MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B	160
Gráfico 12-16: % Tiempo en producción equipos de carga	165
Gráfico 12-17: Media de Factor de Carga en función de la condición de carga	167
Gráfico 12-18: Media de Tiempo de Carga en función de la condición de carga	168
Gráfico 12-19: Media de Tiempo de Acuatamiento Carga en función de la condición de carga.....	169
Gráfico 12-20: Media de Tiempo de Descarga en función de la frente de descarga	170
Gráfico 12-21: Media de Tiempo de Descarga en función de la frente de descarga	171
Gráfico 12-22: PA_MINA.....	177
Gráfico 12-23: PC_MINA.....	177
Gráfico 12-24: CF_MINA.....	178
Gráfico 12-25: CF_STOCK	178

Gráfico 12-26: PA_MINA.....	179
Gráfico 12-27: PC_MINA.....	179
Gráfico 12-28: CF_MINA.....	180
Gráfico 12-29: CF_STOCK	180
Gráfico 12-30: PA_MINA.....	181
Gráfico 12-31: PC_MINA.....	181
Gráfico 12-32: CF_MINA.....	182
Gráfico 12-33: CF_STOCK	182
Gráfico 12-34: Botadero Intermedio	183
Gráfico 12-35: Botadero Oeste.....	183
Gráfico 12-36: Stock Genérico	184
Gráfico 12-37: Botadero Intermedio	184
Gráfico 12-38: Botadero Oeste.....	185
Gráfico 12-39: Stock Genérico	185
Gráfico 12-40: Material Descargado. Real vs Sim.....	189
Gráfico 12-41: Errores Material Descargado. Real vs Sim	189
Gráfico 12-42: Número de Descargas. Real vs Sim	190
Gráfico 12-43: Errores Número de Descargas. Real vs Sim	190
Gráfico 12-44: Factor de Carga. Real vs Sim.....	191
Gráfico 12-45: Errores Factor de Carga. Real vs Sim.....	191
Gráfico 12-46: Distr_Fijo	192
Gráfico 12-47: Estadísticos de Dispersión. Distr_Fijo.....	192
Gráfico 12-48: Distr_Var	193
Gráfico 12-49: Estadísticos de Dispersión. Distr_Var	193
Gráfico 12-50: Medias_Fijo	194
Gráfico 12-51: Estadísticos de Dispersión. Medias_Fijo.....	194
Gráfico 12-52: Medias_Var	195
Gráfico 12-53: Estadísticos de Dispersión. Medias_Var	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Organización del trabajo	8
Figura 2-1: Notación	10
Figura 2-2: Métodos de simulación geoestadística.....	15
Figura 2-3: Distribución de Tiempos según norma ASARCO.....	21
Figura 2-4: Pasos de un estudio de simulación	25
Figura 2-5: Grado de confiabilidad vs nivel de detalle de un modelo.....	26
Figura 2-6: Opciones de despacho de camión libre a equipos de carga	27
Figura 3-1: Tipos de incertidumbre operacional	36
Figura 3-2: Esquema de evaluación de los tipos de incertidumbre operacional	42
Figura 3-3: Red de transporte de material	46
Figura 3-4: Modelo fijo de ausencia de producción	48
Figura 3-5: Modelo variable de ausencia de producción	49
Figura 3-6: Lógica de operación general camión	50
Figura 3-7: Lógica de operación general equipo de carga.....	51
Figura 3-8: Lógica de operación camión en frente de carga.....	52
Figura 3-9: Lógica de operación camión en frente de descarga del tipo simple	53
Figura 3-10: Lógica de operación camión en frente de descarga del tipo chancador	54
Figura 4-1: Red de transporte de material	58
Figura 4-2: Polígonos de corto plazo. Vista en planta.	59
Figura 4-3: Naturaleza de modelamiento de parámetros operacionales	66
Figura 4-4: Resumen opciones operación ante inhabilitación de descarga a chancado.....	72
Figura 4-5: Simbología opciones de operación ante inhabilitación de descarga a chancado	72
Figura 7-1: Esquema evaluación geológica determinista polígono de extracción	112
Figura 7-2: Esquema evaluación geológica estocástica polígono de extracción	113
Figura 7-3: Polígonos de corto plazo. Vista en planta	113
Figura 7-4: Esquema evaluación movimiento material estocástica y generación de movimiento de material promedio.....	116
Figura 14-1: Esquema red de cola. Ejemplo 1	150
Figura 14-2: Esquema red de cola. Ejemplo 2	153

Figura 14-3: Problema de asignación de camiones a circuitos productivos 162
Figura 14-4: Problema de asignación de equipos de carga a frentes de carga
y camiones a circuitos productivos.....164

1 INTRODUCCIÓN

La minería es definida como la actividad industrial consistente en la extracción de material que contiene sustancias de interés naturalmente concentradas desde la corteza terrestre con el objetivo de generar un beneficio económico.

La minería a cielo abierto consiste en la extracción de bloques de material sobre la superficie de la tierra para recuperar el mineral contenido en ellos o bien para acceder ellos. Este proceso minero provoca que la superficie de la tierra sea continuamente excavada causando un incremento de profundidad del pit que se formará hasta el término de la vida de la mina. (Hochbaum y Chen, 2000), (Newman et al., 2010).

La evaluación tradicional de un proyecto minero comprende el desarrollo de una campaña de sondajes y muestreo, la generación de un modelo representativo del yacimiento, la toma de decisiones con respecto a los métodos de explotación mineros y de procesamiento del mineral, la evaluación del nivel de inversión y los costos operativos y el desarrollo de un plan técnico-financiero de la vida de la mina. Adicionalmente, para evaluar el valor de un proyecto, indicadores claves, los cuales incluyen el tamaño del proyecto, nivel de inversión y VAN son desarrollados y usados para generar la mejor toma de decisiones que resulta en la máxima utilidad esperada del proyecto. (Rendu, 1999).

Dentro del contexto de la evaluación de un proyecto minero, surge la planificación minera a cielo abierto, la cual puede ser definida como el proceso de encontrar una secuencia factible de extracción de bloques que genere el máximo VAN, sujeto a restricciones operacionales y técnicas. (Whittle, 1989).

1.1 Descripción del problema

La actividad minera está sujeta a distintos tipos de incertidumbre: mercado, geológica y operacional (Kazakidis y Mayer, 2007). Las incertidumbres antes mencionadas provocan diferencias entre los resultados del plan minero real y esperado. La correcta evaluación del impacto de cada una ellas en los resultados del plan minero podría permitir identificar las que mayor impacto tienen y tratar de gestionarlas mediante planes de acción.

La presente investigación tiene por objetivo la evaluación del impacto de la incertidumbre geológica y operacional en los resultados del plan minero a corto plazo en una faena a cielo abierto.

El proceso de planificación minera de corto plazo a cielo abierto toma como referencia el plan de mediano plazo y se ocupa de definir, secuenciar y agendar polígonos de extracción a lo largo del horizonte temporal considerado. La metodología tradicional de planificación minera a cielo abierto a corto plazo es la que se describe en los siguientes pasos (Troncoso, 2009):

1. Visualización del modelo de bloques para la identificación de los trabajos y desarrollos para acceder a la zona de interés.
2. Despliegue de la fase-banco.
3. Definición de sólidos para cada fase-banco a extraer por período sujeto a las siguientes restricciones:
 - Equipos de carguío y transporte de los que dispone la faena minera.
 - Saturación de planta de procesamiento para cada periodo.
 - Movimiento mina que garantiza el stripping de estéril establecido por el plan de largo plazo para el horizonte temporal de corto plazo que se está planificando.
 - Restricciones geo-metalúrgicas impuestas por el área de procesamiento para cada período.

Esta metodología, sin embargo, posee una serie de deficiencias:

- Se asume un único estado operacional, sobre el cual se calculan los resultados del sistema de manera determinista, soslayando los otros estados operacionales posibles.
- No integra la incertidumbre geológica y operacional que se encuentran intrínsecamente presentes en el proceso de extracción de material.
- No está sustentado por la lógica operacional real de sistema de manejo de materiales.

Ante la problemática expuesta, se propone una metodología que tome un plan minero de corto plazo a cielo abierto fijo y que permita evaluar el impacto de la incertidumbre geológica y operacional en los resultados del plan.

Un plan minero contiene de forma implícita una serie de actividades que a medida que son completadas se produce la extracción de material desde los polígonos. Estas actividades están sustentadas por los **componentes mineros** del sistema, tanto principales (perforadoras, equipos de carga, camiones mineros, chancador primario) como de servicio (camión regador, bulldozer, wheeldozer, motoniveladoras, camiones fábrica, polvorín móvil, etc.).

Los polígonos de extracción son la unidad más pequeña de selectividad de extracción en minería a cielo abierto. Cada polígono de extracción posee características que lo identifican, dentro de las más destacables se encuentran la cantidad de material y la calidad de material de interés (ley). Estas

propiedades geológicas generalmente se cuantifican en términos de medias y no se evalúa su variabilidad.

Por otra parte, un plan minero integra el **secuenciamiento** y el **agendamiento** de los polígonos de extracción.

El secuenciamiento de polígonos se refiere al orden sucesivo de extracción. Es meramente una relación secuencial de extracción entre polígonos.

Por otra parte, el agendamiento de polígonos de extracción consiste en una evaluación del avance temporal de extracción de polígonos, la que idealmente debiera estar sustentada por el sistema de manejo de materiales.

Dentro del contexto de la planificación minera a cielo abierto a corto plazo, muy a menudo los conceptos de **secuenciamiento** y **agendamiento** minero se confunden. La distinción entre estos dos conceptos dentro del proceso de planificación minera es útil a la hora de desarrollar y evaluar planes mineros confiables. Se entiende por **confiabilidad** de un plan minero como la capacidad de alinear sus resultados esperados con los resultados obtenidos en la realidad.

Como se mencionó, un agendamiento consiste en una evaluación del avance temporal de extracción de polígonos mineros secuenciados. La calidad de esta evaluación es la clave para la obtención de planes mineros confiables.

Una evaluación sencilla de un agendamiento de polígonos consiste simplemente en asociar una capacidad de extracción de material constante para todos los períodos de tiempo considerados. Esta capacidad de extracción es estimada usando fórmulas que consideran promedios del desempeño del sistema minero y no se sustenta en forma explícita en las actividades a realizar por los componentes del sistema de manejo de materiales. Esta metodología dista de una evaluación confiable del agendamiento de polígonos. Sin embargo, es útil a la hora de secuenciar la extracción de polígonos en donde la dimensión temporal no está sustentada explícitamente por el sistema de manejo de materiales.

Un enfoque alternativo para la evaluación del agendamiento de la extracción de polígonos, es la que considera la lógica de operación real de extracción, la cual está íntegramente soportada por el sistema de manejo de materiales, que involucra las operaciones unitarias de perforación, tronadura, y carguío y transporte y que además considera la variabilidad de las propiedades geológicas de los polígonos de extracción.

Lo discutido anteriormente tiene relación con un problema frecuente en la industria minera, que tiene que ver con las diferencias entre los planes mineros planificados y los obtenidos en la realidad. En los proyectos mineros, desviaciones de los planes mineros óptimos pueden resultar en pérdidas

financieras significativas, futuras deudas financieras, retrasos de recuperación de mineral y la inutilización de recursos. (Ben-Awuah, 2013).

Esta problemática tiene varias fuentes explicativas. En cuanto a la dimensión operacional, los siguientes aspectos son fuente de discrepancias entre los resultados planificados y los reales:

- La lógica de operación del sistema de manejo de materiales para un estado operacional determinado no es completamente comprendida: Un aspecto de esto tiene que ver con el despacho de camiones hacia equipos de carga activos. Por ejemplo, el algoritmo de despacho de camiones en operaciones mina puede ser manual o automático. En cualquiera de las dos modalidades de despacho, a veces no siempre son claros los criterios con los cuales se toma la decisión de despacho. Más aún, con la modalidad de despacho manual, la decisión de despacho de un camión no es posible de replicar en forma total puesto que depende de los criterios de una persona o grupo de personas.
- La gestión de mantenciones programadas de equipos ante eventos operacionales no es explícitamente documentada: Es decir, el aprovechamiento de traslape de mantenciones programadas frente a cambios de estados operacionales. Por ejemplo: Ante una falla de un equipo de carga, es posible adelantar la mantención programada de un camión minero que estaba asignado al equipo de carga en falla. De esta manera, frente ante un evento operacional se puede mejorar la gestión de otros equipos y con esto el desempeño del sistema.
- No existencia de la evaluación de las reasignaciones operacionales de los componentes mineros ante eventos operacionales. En efecto, pueden existir planes de contingencia no escritos que operaciones minas tenga "bajo la manga" para aplicarlos. Sin embargo, no existe una evaluación de esta reasignación operacional, en términos de resultados. Operaciones mina posee un gran abanico de reasignaciones operacionales posibles. Esto trae como problema lo siguiente: Puede existir una reasignación operacional distinta ante eventos operacionales similares puesto que la reasignación operacional escogida depende meramente de los criterios de cada uno de los equipos de operaciones mina. Distintos grupos mineros podrían tomar distintas reasignaciones operacionales ante eventos operacionales similares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

El principal objetivo de este trabajo es la evaluación del impacto de la incertidumbre geológica y operacional presentes en un sistema de manejo de materiales de una faena a cielo abierto, en los resultados de los planes mineros

de corto plazo, categorizando los impactos relativos de cada una de las incertidumbres.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar las fuentes de incertidumbre geológica y operacional presentes en un sistema de manejo de materiales en una operación a cielo abierto.
- Proponer modelos de incertidumbre que cuantifiquen estas distintas fuentes de incertidumbre.
- Cuantificar las fuentes de incertidumbre que más impactan a los resultados del plan minero.

Dentro de la evaluación de la incertidumbre operacional, se tienen los siguientes objetivos secundarios:

- Identificar las fuentes de incertidumbre presenten en un sistema de manejo de materiales.
- Desarrollar modelos de incertidumbre que cuantifiquen la incertidumbre operacional de cada uno de los parámetros operacionales presentes en las operaciones de carguío y transporte de material.
- Desarrollar un modelo de simulación por eventos discretos que represente un sistema real de carguío y transporte de material.
- Evaluar el impacto de la incertidumbre operacional en los resultados del plan minero usando el modelo de simulación.

Dentro de la evaluación de la incertidumbre geológica, se tienen los siguientes objetivos secundarios:

- Evaluación de la incertidumbre geológica de los polígonos de extracción de corto plazo en términos de:
 - Ley de cobre total (CuT).
 - Ley de cobre soluble (CuS).
 - Solubilidad.

1.3 Alcances

El presente trabajo se enmarca dentro de los siguientes alcances:

- Planificación minera a corto plazo en faenas a cielo abierto, con un horizonte temporal total de longitud semanal (10 turnos) y longitud de cada período de un turno (12 horas).
- El sistema de manejo de material considera las operaciones de carguío y transporte de material. El material procesado va desde el frente de carga y termina su proceso en el chancador primario.

- El soporte físico de material extraído será de polígonos de extracción por tronadura.
- Se entienden como parámetros operacionales los siguientes:
 - Factor de carga.
 - Tiempo de carga.
 - Tiempo de acuatamiento en carga.
 - Tiempo de descarga.
 - Tiempo de acuatamiento en descarga.
- Dentro del contexto de la evaluación de la incertidumbre geológica, se considera las siguientes características de los polígonos de extracción:
 - Ley de cobre total.
 - Ley de cobre soluble.
 - Solubilidad.
- El caso de estudio corresponde al de una faena minera a cielo abierto ubicada en el norte de Chile, cuyo yacimiento es del tipo pórfido cuprífero y que explota la zona de minerales oxidados de cobre.

1.4 Metodología

La evaluación de la incertidumbre geológica y operacional se realizará de forma independiente, de tal manera de desacoplar su impacto. Esto es útil en la etapa de análisis de resultados.

- Incertidumbre operacional:
 - Identificar los distintos tipos de incertidumbre operacional.
 - Caracterizar los parámetros operacionales del sistema minero en estudio.
 - Desarrollar un modelo de simulación que permita integrar los tipos de incertidumbre operacional.
 - Realizar experimentos para evaluar el impacto de cada tipo de incertidumbre operacional en los resultados del plan minero.
 - Análisis de resultados, conclusiones y propuestas de trabajo futuro.
- Incertidumbre geológica:
 - Identificar la naturaleza de las fuentes de incertidumbre geológica.
 - Acotar las variables geológicas a estudiar: cobre total, cobre soluble y solubilidad.
 - Realizar una estimación por kriging de las variables geológicas.
 - Efectuar simulaciones condicionales de las variables geológicas.
 - A partir de las simulaciones geológicas realizadas, evaluar la incertidumbre de las variables geológicas en estudio para los polígonos de extracción en un plan de corto plazo.
 - A partir del modelo de bloques estimado por kriging, evaluar la media de las variables geológicas en estudio.

- Validar los procedimientos de estimación y simulación comparándolos entre ellos.
- Obtención de un plan de movimiento de material medio a partir del modelo de simulación.
- Cuantificación de la incertidumbre de las variables geológicas en estudio a partir del promedio del movimiento de material a chancador primario.
- Análisis de resultados, conclusiones y propuestas de trabajo futuro.

La metodología propuesta permite obtener los siguientes resultados:

- Cantidad de material depositado, por equipo de carga, frente de carga y frente de descarga.
- Ley de cobre total de alimentación a chancado.
- Ley de cobre soluble de alimentación a chancado.
- Solubilidad media de alimentación a chancado.

1.5 Organización del trabajo

El presente trabajo está organizado en 9 capítulos.

El capítulo 1 contiene una introducción al tema desarrollado, la que consta una descripción del problema, los objetivos, metodología y alcances del trabajo.

El capítulo 2 desarrolla un análisis bibliográfico que sirve como marco de referencia para el desarrollo del trabajo. Se expone una breve introducción a la planificación minera, a los tipos de incertidumbre presentes en minería, la problemática entre las diferencias entre lo planificado y la realidad, una breve revisión de herramientas de estimación de productividad de un sistema minero y una concisa revisión de heurísticas de despacho de camiones en faenas a cielo abierto.

El capítulo 3 presenta el trabajo desarrollado asociado a la incertidumbre operacional en donde se identifican y caracterizan los distintos tipos de incertidumbre operacional y posteriormente se describe el modelo de simulación que sustenta la evaluación de la incertidumbre operacional.

En el capítulo 4 se presenta el estudio de caso enfocado a la evaluación de la incertidumbre operacional, definiendo los distintos tipos de experimentos de manera de cuantificar los distintos tipos de incertidumbre operacional en los resultados de los planes mineros.

En el capítulo 5 se exponen los resultados y análisis de resultados de los experimentos definidos en el capítulo anterior. Aquí se contrastan las hipótesis originales con los resultados obtenidos.

En el capítulo 6 se presenta el estudio de caso enfocado a la evaluación de la incertidumbre geológica, definiendo los distintos tipos de experimentos

de manera de cuantificar las características geológicas en los resultados de los planes mineros.

En el capítulo 7 se exponen los resultados de los experimentos definidos en el capítulo anterior y el análisis de resultados del caso de estudio asociado a la incertidumbre geológica. Aquí se contrastan las hipótesis originales con los resultados obtenidos.

En el capítulo 8 se realiza una comparación entre los finos de cobre in situ para las fuentes de incertidumbre operacional e incertidumbre geológica, usando los resultados de los experimentos realizados anteriormente.

En el capítulo 9 se reportan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los resultados del trabajo.

Finalmente, en el capítulo 9 se presentan los trabajos a futuro que permiten mejoras al modelo propuesto y proseguir la línea de investigación.

La siguiente figura resume de forma esquemática la organización del trabajo.

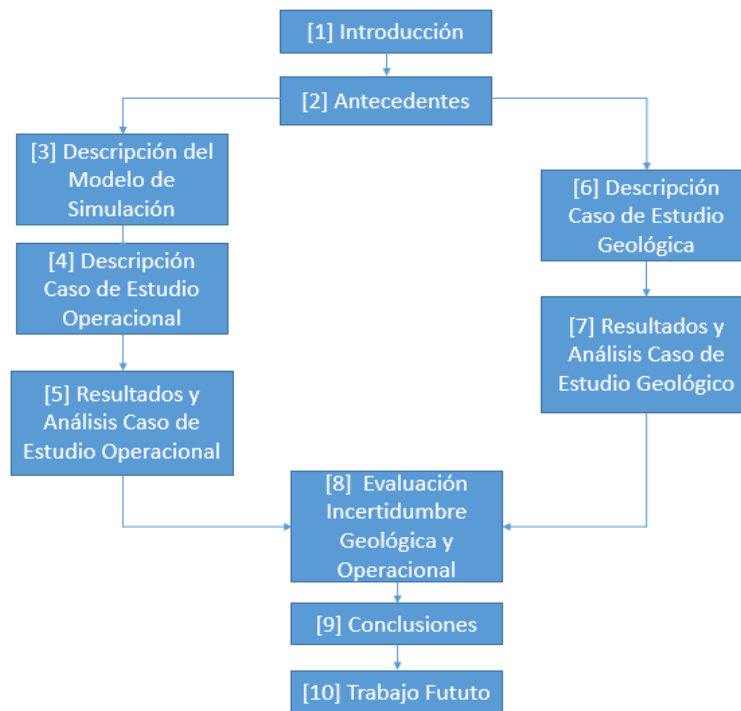


Figura 1-1: Organización del trabajo

2 ANTECEDENTES

2.1 Planificación minera

La planificación minera a cielo abierto puede ser definida como el proceso de encontrar una secuencia factible de extracción de bloques que genere el máximo VAN, sujeto a restricciones operacionales y técnicas (Whittle, 1989).

Es posible separar en niveles el proceso de planificación de acuerdo a las características de las decisiones tomadas en:

- **Estratégicas:** Se refieren a la elección de los métodos de explotación, capacidad mina, procesamiento y en general las estimaciones de reservas mineras. El principal objetivo de la planificación estratégica es sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía.
- **Tácticas:** Corresponden a la especificación de los procesos a realizar a lo largo de la vida de la mina, como los programas de producción de largo plazo y los modelos de programación para la utilización de equipos y plantas de procesamiento. La planificación táctica o conceptual determina la forma de alcanzar el objetivo establecido previamente por la planificación estratégica. Su resultado es el plan minero, que define el cómo y el cuándo se extraerán los recursos, estableciendo los recursos humanos y materiales a utilizar.
- **Operativas:** Se realizan con frecuencia diaria, por ejemplo, dirección de despacho de un camión. Dentro de la planificación operativa se incluyen los procesos e índices operativos resultantes del plan minero. Es aquí cuando se produce la retroalimentación con la planificación conceptual (Newman et al., 2007).

El agendamiento de la producción es definido como la toma de decisiones acerca de la secuencia de extracción de unidades mineras, y la cantidad de mineral y estéril que debe ser enviado a los destinos correspondientes, tales como plantas de procesamiento, stocks y botaderos (Eivazy y Askari-Nasab, 2012).

Según (Hustrulid, 2006) la planificación de la producción se clasifica según el horizonte temporal de planificación y el intervalo de tiempo de cada período de planificación en dos tipos:

1. Planificación de la producción de largo plazo.
2. Planificación de la producción de corto plazo.

Se entiende por confiabilidad de un plan minero como la capacidad de alinear sus resultados esperados con los resultados obtenidos en la realidad.

2.2 Diferencia entre resultado planificado y real

Un problema recurrente en minería son las diferencias entre los resultados planificados y lo obtenido en la realidad. Una evidencia de lo anterior es el Gráfico 2-1 que compara los movimientos reales y proyectados para un mes de una faena minera real.

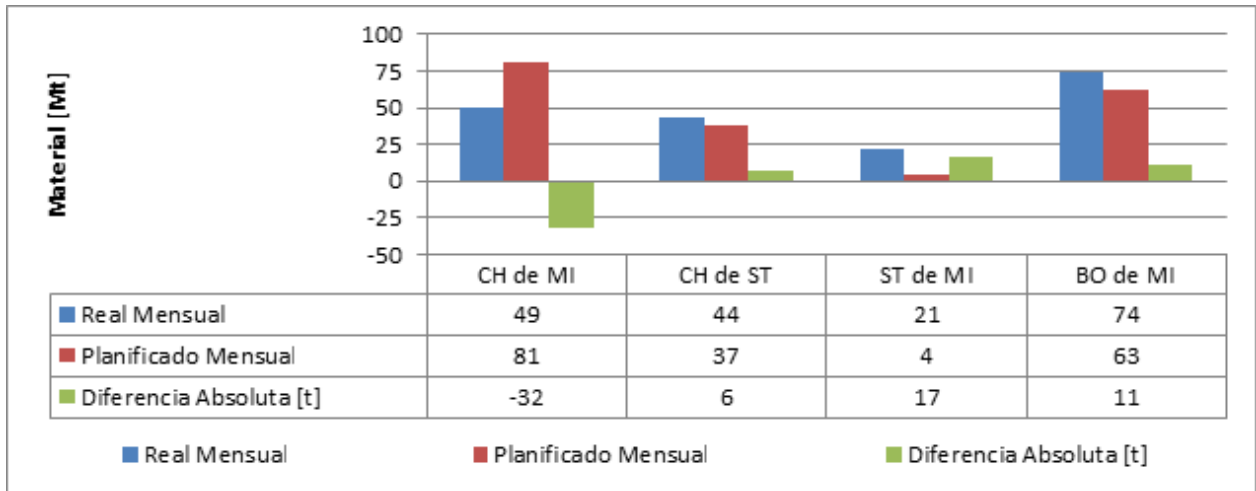


Gráfico 2-1: Ejemplo de Producción Real vs Planificado.

Mensual [Mt]	CH de MI	CH de ST	ST de MI	BO de MI
Real Mensual	1.48	1.32	0.64	2.22
Planificado Mensual	2.44	1.12	0.13	1.88
Diferencia Absoluta	-0.95	0.19	0.51	0.34
Diferencia Relativa [%]	-39	17	378	18

Tabla 2-1: Producción Real vs Planificado.

MI	Mina
BO	Botadero
CH	Chancado
ST	Stock

Figura 2-1: Notación

Ante la problemática de que los planes de producción no se cumplen, (Palma, 2014) comenta las explicaciones frecuentes que distintas áreas dan a este hecho:

- Planificación mediano-largo plazo explica que no se cumplen las metas debido a que la operación no se ciñe al plan.

- Planificación corto plazo explica que la producción no se cumple debido a que el plan realizado por planificación mediano-largo plazo no es realista.
- Operaciones mina explica que la producción no se cumple debido a que planificación no considera los contratiempos y detalles de la operación.

En este contexto, (Palma, 2014) se pregunta: ¿Existe un nexo entre la planificación mediano-largo plazo con la planificación corto plazo y la operación? En la mayoría de los casos, esta respuesta es negativa. En el caso de ser una respuesta afirmativa, la integración entre estas tres áreas es restringida.

A continuación se discuten diversos tópicos en relación a esta problemática.

2.2.1 Concepto de estrategia y meta

Frecuentemente el plan minero a corto plazo no se ocupa de definir en forma explícita cuál es la estrategia operacional para lograr los resultados, si no que meramente establece una meta productiva basada en indicadores productivos medios del sistema de manejo de materiales, o bien, la definición de la estrategia operacional es parcial y muy vaga. Esta meta productiva debe ser alcanzada por operación mina no importando los distintos estados operacionales que se van sucediendo conforme avanza el turno. A veces, esta meta productiva no está para nada alineada con los distintos estados operacionales que se suceden a lo largo del turno y posiblemente puede ser imposible de alcanzar.

Mencionado lo anterior, es importante distinguir entre los conceptos de estrategia y meta dentro del contexto de la planificación minera.

La meta es lo que se quiere conseguir. Generalmente es el alcance de una meta productiva, que es calculada por medio de los indicadores productivos medios del sistema de manejo de materiales.

Una estrategia es la manera en que se alcanza una meta definida. Tiene que ver como se asignan los diversos componentes mineros en función de los distintos estados operacionales a los cuales se enfrenta el sistema minero a lo largo del tiempo. Idealmente la estrategia debe adecuarse al estado operacional actual del sistema.

2.2.2 Planes operacionales de contingencia

Otra fuente de discrepancias entre lo planificado y lo obtenido en la realidad es la no existencia de planes operacionales de contingencia predefinidos en forma explícita frente a cambios de estado operacionales que podrían ocurrir a lo largo de un turno. El proceso de planificación minera simplemente asume el estado más probable de operación y planifica de acuerdo a ese estado. Este estado puede ser diferente al obtenido en la realidad del turno, por lo que se originan discrepancias entre lo planificado y lo realmente obtenido.

Ejemplos de inexistencia de planes de contingencia:

- La política de asignación de frentes de carga a equipos de carga frente a cambios en las condiciones operacionales no existe explícitamente o es vaga.
- La reasignación de camiones a equipos de carga operativos ante una caída de un equipo de carga no está definida.
- El cambio de destino de mineral ante una caída imprevista del chancador primario no está definido.
- Las posibles reasignaciones de equipos carga hacia otros frentes no están definidas o dependen del criterio de operaciones mina.

Los planes de contingencia probablemente no son desarrollados porque no se tiene la seguridad total de que serán aplicados a lo largo de un turno. Son planes latentes, que se aplican ante un evento operacional que posiblemente ocurra.

2.2.3 Parámetros operacionales

Se entiende por **parámetro operacional** a la cuantificación de alguna propiedad de una actividad operacional la cual necesita ser caracterizada para el proceso de planificación. Algunos ejemplos de parámetros operacionales:

- Tiempo de acuatamiento de un camión en un frente de carga hacia un equipo de carga dado.
- Tiempo de carga de un equipo de carga a un equipo de transporte dado
- La velocidad aislada de un camión cargado en un tramo horizontal.
- Cantidad de carga por la cual un equipo de carga llena un camión.

La naturaleza de los parámetros operacionales puede ser del tipo determinista o estocástica, dependiendo si son descritos por número reales fijos o por distribuciones de probabilidad, respectivamente.

Los parámetros operacionales podrían usar medias sesgadas con la realidad. Este aspecto es una fuente de diferencia entre los resultados planificados y los resultados reales.

2.3 Incertidumbre en minería

La incertidumbre se puede dividir según su fuente de origen, pudiendo ser externa o interna. Se entiende por una fuente de origen externa aquellas ajenas a la empresa y por internas, aquellas dictadas por los activos y organización propias de ésta. En minería, la principal fuente de incertidumbre externa corresponde al mercado (precio del commodity, precio y disponibilidad de insumos críticos, monto de la inversión, etc.). La incertidumbre de mercado se considera externa siempre y cuando las empresas no tengan la capacidad de influenciar el precio del commodity que producen. La incertidumbre geológica y operacional son las más relevantes como fuente de origen interna.

En base a esto, los tres tipos de incertidumbre que gobiernan el negocio minero corresponden a: geológica, operacional y mercado. (Kazakidis y Mayer, 2007).

Por otro lado, el riesgo de un proyecto minero puede surgir de tres fuentes principales: técnicas (geológicas y mineras), financieras y medioambientales. La mayor fuente de riesgo técnico es la incertidumbre en leyes, tonelaje, geología y geomecánica (Dimitrakopoulos, 2011). Aunque los déficits en producción son también debido a problemas de escalamiento de plantas piloto a planta comerciales, la cantidad y la ley de mineral son los mayores contribuyentes a los potenciales déficits (Rossi y Parker, 1994). Es por esto que en el presente trabajo, el enfoque de la incertidumbre en minería se centra en las incertidumbres geológica y operacional.

2.4 Incertidumbre geológica

La metodología tradicional de planificación minera consiste en el desarrollo la estimación de reservas, diseño y optimización de planes mineros y productivos bajo un único escenario del yacimiento en estudio. Los métodos geoestadísticos usados para modelar un único escenario del yacimiento no son capaces de reproducir la variabilidad in-situ de las leyes. Por lo tanto, es necesario incorporar incertidumbre geológica al diseño, planificación y evaluación de proyectos mineros (Dimitrakopoulos, 2011).

Con respecto a la incertidumbre geológica en términos de leyes del elemento de interés, ésta dependerá del tipo de yacimiento en estudio, debido a que la variabilidad de las leyes depende principalmente de:

- Continuidad espacial de las leyes (efecto pepita, alcance de correlación).
- Incertidumbre geológica (cuerpos bien definidos reducen la incertidumbre).
- Cantidad de datos disponibles (a mayor cantidad de datos, menor incertidumbre).
- Soporte de bloques (a mayor soporte, menor incertidumbre) (Emery, 2009).

Para la evaluación de la incertidumbre geológica de leyes de material de interés se pueden desarrollar simulaciones geoestadísticas, puesto que el kriging no es una herramienta que permita la cuantificación de esta variabilidad (Emery, 2009). Como señala (Dimitrakopoulos et al., 2002), las tecnologías de simulaciones condicionales ofrecen un primer paso clave en el modelamiento de la incertidumbre geológica.

2.4.1 Simulación geoestadística

El trabajo de (Vann et al., 2002) da una excelente visión general de la simulación geoestadística.

Vann et al. proporcionan una definición de la simulación geoestadística, entendiéndola como la extensión espacial del concepto de simulación de Monte Carlo. Además de reproducir el histograma de datos, las simulaciones geoestadísticas también reproducen la variabilidad espacial de los datos, usualmente caracterizada por un modelo variográfico. Si las simulaciones reproducen los datos originales, se dice que las simulaciones son condicionales. Las simulaciones condicionales pueden ser consideradas como imágenes equiprobables de la mineralización a escala fina. En este sentido, las simulaciones son un intento de 'muestrear lo desconocido' usando restricciones, por ejemplo, momentos estadísticos impuestos por los datos.

Vann et al. mencionan que los métodos de simulación estadística a usar dependen de la naturaleza de la variable a ser simulada, existiendo tres clases:

- Variables continuas: Representan propiedades físicas (por ejemplo, leyes, profundidad de una capa sedimentaria).
- Variables categóricas: Por ejemplo: litologías, unidades geológicas.
- Objetos: Variables que se definen por su localización, forma y orientación (por ejemplo: canales sedimentarios, granos de mineral).

Vann et al. prosiguen con una clasificación general (pero no exhaustiva) de los métodos de simulación geoestadísticos. Los métodos de simulación geoestadísticos dependen del modelo de distribución de la variable de interés, la cual está parcialmente caracterizada por el histograma y el variograma. La clasificación se muestra en la Figura 2-2.

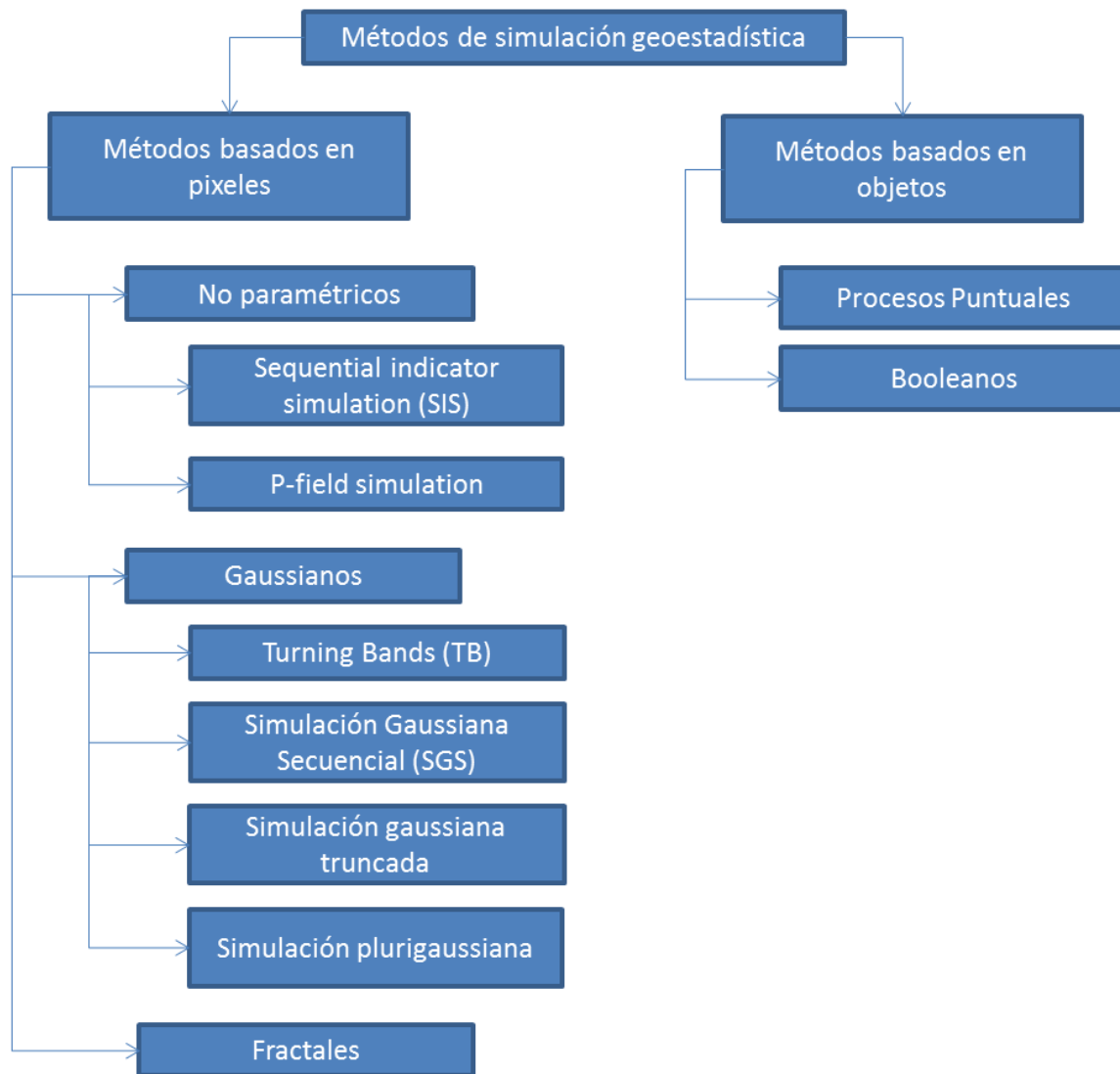


Figura 2-2: Métodos de simulación geoestadística

2.4.2 Aplicaciones a la industria minera

Los modelos de simulación geoestadísticos poseen diversas aplicaciones en la industria. En efecto, (Vann et al., 2002) señala lo siguiente:

- Los métodos de simulación por procesos puntuales pueden ser aplicados en un amplio rango de fenómenos tales como la distribución de árboles en un bosque o gemas en un depósito de piedras preciosas.
- Por su parte, los modelos booleanos han encontrado el gusto de los geólogos del petróleo que aprecian el 'degrade' geológico de la arquitectura del depósito reconstruido.

- Los modelos gaussianos son consistentes con los depósitos minerales que exhiben transiciones de leyes: de altas leyes en un núcleo hacia leyes menores en anillos lejanos (a varias escalas). En situaciones mineras, se ha aplicado a muchos tipos de depósitos, incluyendo pórfidos de Cu-Au y algunos tipos de sistemas de oro arcaicos.

Específicamente, las simulaciones condicionales se han aplicado al diseño, planificación y evaluación de proyectos mineros (Dimitrakopoulos, 2011).

El trabajo de (Dimitrakopoulos, 2011) indica dos maneras de realizar optimización estocástica aplicado al desarrollo de planes de producción. Estos son Simulated Annealing (SA) y programación entera estocástica (SIP).

SA es un método de optimización heurístico que se basa en s planes de producción asociados a las s réplicas del yacimiento en estudio. Dentro de los s planes, existirán bloques que son extraídos en un 100% en un período dado, mientras que existirán bloques que no tienen 100% de ser extraídos en un periodo dado. Lo que realiza la heurística es cambiar el periodo de los bloques que no tienen una probabilidad de 100% de ser extraídos en un periodo dado, de tal manera de minimizar el promedio de las desviaciones de las metas productivas para sobre cada uno de los periodos y para una serie de s réplicas de un yacimiento.

Por su parte, SIP minimiza las desviaciones del plan de producción junto con maximizar VAN para generar planes de producción factibles. Se basa usando las s réplicas del yacimiento en estudio.

El trabajo aplica los métodos a un yacimiento de cobre y compara los resultados obtenidos con el enfoque tradicional de la industria (Whittle).

Los análisis de los resultados concluyen que los métodos de optimización estocástica (SA y SIP) agregan valor del orden del 25% a los planes de producción tradicionales.

Además, los pits finales estocásticos generan son 15% más grandes en términos de tonelaje que los pits finales generados de la forma tradicional. Esta diferencia aumenta la vida de la mina y agrega del orden de 10% de VAN en comparación a los planes de producción optimizados estocásticamente, circunscritos al pit final determinado de forma tradicional.

Se concluye que considera la incertidumbre de los yacimiento junto con herramientas de optimización estocástica para los planes de producción agrega valor al negocio minero.

Otra aplicación de las simulaciones condicionales a la industria minera es la investigación de (Mehager et al., 2010). Este estudio aborda la problemática respecto a la definición de pit final y pits anidados. El enfoque clásico posee la deficiencia de valorizar de forma única cada bloque, independiente del período en que se extraerá y predefiniendo un destino, lo que provoca la confección de planes de producción sub-óptimos. El trabajo tiene por objetivo incorporar

incertidumbre a la valorización de bloques en términos de precios y leyes y también considera el valor del dinero en el tiempo.

La metodología consiste en la valorización bajo incertidumbre de precios y leyes y un algoritmo de definición de pits anidados que incorpora el valor del bloque en el tiempo y flexibilidad en el destino final del bloque.

El caso de estudio analizado obtiene valores mayores que el enfoque tradicional.

La publicación de (Dimitrakopoulos et al., 2002) postula argumentos económicos para la incorporación de la incertidumbre en geología, leyes y tonelajes al proceso de planificación y diseño de minas a cielo abierto. Esta investigación reconoce que la presencia del riesgo geológico en los proyectos mineros es bien conocida y apreciada. Se señala que durante los últimos años la evolución de las tecnologías ha permitido modelar directamente el riesgo geológico. Como resultado, diversas publicaciones que usan simulaciones condicionales al negocio minero han surgido, tales como:

- Integración de incertidumbre en leyes en la optimización de pits y reservas recuperables (Dowd, 1994), (Rossi y Camacho, 2000).
- Tecnologías y algoritmos para modelamiento del riesgo geológico en la optimización del pit y el agendamiento de la producción (Dimitrakopoulos, 1998).
- Riesgo en proyectos mineros y límites del pit final (Dowd, 1998).
- Impacto de las zonas de alta ley en límites óptimos del pit (Manfrino, 1999).
- Análisis de riesgo para el agendamiento de la producción (Ravenscroft, 1992), (Smith y Dimitrakopoulos, 1999).

Finalmente, este trabajo presenta un caso de estudio de un yacimiento de oro de baja ley en donde se remarcan las diferencias entre las proyecciones financieras basadas en un modelo de yacimiento y los posibles resultados de las diversas simulaciones del yacimiento. Este trabajo explica las razones claves del por qué de los beneficios asociados a la comprensión y cuantificación de la incertidumbre y el riesgo.

2.5 Incertidumbre operacional

La cuantificación de la incertidumbre operacional en sistemas de manejo de materiales en faenas a cielo abierto ha sido abordada por numerosos autores. En la literatura predomina los estudios que tratan de cuantificar la influencia de la política de despacho de camiones en los resultados del sistema, dejando a veces de lado otros aspectos mineros tales como las asignaciones de equipos de carga a polígonos de extracción.

La investigación de (Torkamani, 2013) realiza esfuerzos para enlazar planes mineros de corto plazo (de extensión de años con períodos de meses) con

simulación por eventos discretos. Torkamani propone un MILP (Mixed Integer Linear Problem, en español Problema de Optimización Lineal Entero Mixto) de asignación de equipos de carga y transporte a polígonos de extracción, sin embargo su integración con el modelo de simulación queda propuesta para futuras investigaciones. La función objetivo del problema es minimizar los costos de operación de la asignación. También propone un modelo de simulación de un sistema de manejo de materiales desarrollado en el software comercial Arena®. El modelo integra la asignación de polígonos de extracción con los equipos de carga y descarga. Los parámetros operacionales son de naturaleza estocástica y son derivados del análisis estadístico de datos históricos. Los modelos de tiempo entre bajas y tiempo para reparar son asumidos tanto en su forma como en sus parámetros (es decir, no derivan de un análisis estadístico de datos reales). El modelo de simulación soporta solo un tipo de equipo de carga y solo un tipo de equipo de transporte. Además no soporta un perfil de velocidades en los viajes en carga y descarga, si no que asume una velocidad constante para cada viaje.

El trabajo de (Mena et al., 2013) propone una herramienta que integra la simulación de eventos discretos de un sistema de manejo de materiales en una faena a cielo abierto con un MILP de asignación de equipos de transporte a circuitos productivos. El MILP de asignación no se hace cargo de la asignación de equipos de carga a frentes de carga, pues escapa a sus alcances. Por lo tanto, la red de transporte de materiales es fija en términos que los frentes de carga siempre están asociados a los mismos equipos de carga, por lo que el modelo es poco flexible en ese aspecto. La función objetivo maximiza la producción esperada del sistema. El modelo de simulación considera parámetros estocásticos tanto para parámetros operacionales como para los tiempos entre fallas y tiempos de reparación para los equipos de carga y transporte.

La publicación de (Fioroni et al., 2008) permite confeccionar planes mineros de corto plazo en faenas mineras a cielo abierto, obteniendo planes factibles, confiables y certeros integrando simulación y optimización en una herramienta de ejecución simultánea. El problema de optimización integra la asignación de equipos de carga a polígonos de extracción y la cantidad de viajes que un equipo de transporte debe realizar, sujeto a restricciones de producción y de mezcla. El modelo de optimización es llamado en tiempo de simulación cada vez que el estado del sistema cambia: cada vez que hay una mantención de equipos de carga o de transporte y cada vez que se agota un polígono de extracción.

Dentro de la investigación de (Çetin, 2004), se incluye una completa revisión bibliográfica de heurísticas de despacho de camiones en un sistema de manejo de materiales en una faena a cielo abierto y además desarrolla un modelo de simulación de forma de comparar las distintas políticas de despacho en

términos de producción total. Su conclusión principal es que no existe evidencia estadística de que una heurística particular que domine a las otras en términos de producción del sistema. Es importante mencionar que el caso de estudio desarrollado por Çetin se basa en una mina hipotética y asume distribuciones normales para los tiempos de carga, descarga, tiempos de viaje en carga, tiempos de viaje en descarga. Los parámetros de las variables aleatorias son asumidos arbitrariamente, lo que podría no estar alineado con la variabilidad real de los parámetros operacionales.

A lo largo de las lecturas de la revisión bibliográfica, se concluye que las técnicas utilizadas para representar la naturaleza estocástica de los parámetros operacionales son asociarlas a distribuciones de probabilidad que posteriormente son alimentadas al modelo de simulación. Por otra parte, para representar los cambios de estado en operación y no operación de equipos de carga y transporte la literatura asume directamente distribuciones de probabilidad para el tiempo entre fallas (Time Between Failures, TBF) y el tiempo para reparar (Time To Repair, TTR). Este método soslaya la existencia de mantenciones programadas de los componentes mineros, cuyo inicio y duración se conocen de antemano.

2.6 Algunas herramientas de evaluación de sistemas de manejo de materiales

Para evaluar los resultados de un sistema de manejo de materiales existen varias herramientas. A continuación se describen brevemente tres de ellas, las cuales son las más populares en la industria minera y en el campo de la investigación de operaciones. Sin duda existen otras herramientas que involucran matemáticas más complejas y son menos conocidas.

- Fórmulas analíticas.
- Mean Value Analysis (MVA).
- Simulación de eventos discretos.

La herramienta usada en esta tesis es la de simulación por eventos discretos. Sin embargo, un ejercicio de aplicación minera del Mean Value Analysis se describe en la sección 13.1.

La herramienta de fórmulas analíticas es la más usada y extendida en la industria por lo que no es necesario profundizar más en ella.

2.6.1 Fórmulas analíticas

Corresponde a calcular el rendimiento de un sistema de manejo de materiales mediante fórmulas analíticas. Se basa en el cálculo del tiempo de ciclo y la cantidad de carga que transporta un camión. Por medio de los indicadores

temporales se pondera los rendimientos de los equipos para obtener un rendimiento nominal.

Norma ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante un periodo de tiempo. Documentos internos de diversas compañías mineras definen la norma ASARCO de acuerdo a su criterio. Para describir la norma ASARCO se toma el modo definido por (Codelco, 2005) dentro de sus documentos corporativos.

A continuación se describe la definición de tiempos de acuerdo a la norma ASARCO.

Definición de tiempos

- **Nominal:** Espacio de tiempo en que se produce la medición (espacio muestral). Este dependerá del tiempo de continuidad de faena productiva.
- **Fuera de Servicio:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico, eléctrico o electrónico.
- **Disponible:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra habilitado para cumplir con su función de diseño.
- **Reserva:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para cumplir su función de diseño no teniendo operador que lo utilice, o que bajo una condición específica del avance de la operación o condición climática (extrema), no pueda ser operado.
- **Operativo:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto, con operador y cumpliendo con las actividades asociadas a la operación.
- **Demoras Programadas:** Espacio de tiempo en que el equipo no cumple su función de diseño debido a actividades normadas por ley, como lo son el medio turno o descanso legal y el cambio de turno.
- **Demoras No Programadas:** Espacio de tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño, debido a condiciones o circunstancias propias de la operación, o ineficiencias de esta.

- **Pérdidas Operacionales:** Espacio de tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño, debido a la espera de equipo o instalación complementaria.
- **Efectivo:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para las cuales ha sido adquirido por la organización.

Tiempo Nominal				
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio (M/R)
				Programadas
				Imprevistos
Tiempo Operativo			Reservas	
Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras		
		Progr.	No Progr.	

Figura 2-3: Distribución de Tiempos según norma ASARCO

A continuación se describen los indicadores de tiempo definidos de acuerdo a la norma ASARCO.

Indicadores de tiempo

Disponibilidad: Es el porcentaje de horas nominales en que la flota, equipo, máquina o instalación, estuvo en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operado.

El indicador establece la capacidad de la función de mantenimiento y establece el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación.

$$\% \text{ Disponibilidad} = \frac{\text{Horas Nominales} - \text{Horas Mantenimiento y Reparación}}{\text{Horas Nominales}} * 100$$

Utilización (Base Nominal): Es el porcentaje sobre horas nominales en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra efectivo. Esto es igual al número de horas efectivas divididas por las horas nominales.

El indicador provee información sobre la eficacia de la función global operacional mina, respecto del uso eficiente que se les da a flotas, equipos, máquinas o instalaciones.

$$\% \text{ Utilización (Base Nominal)} = \frac{\text{Horas Efectivas}}{\text{Horas Nominales}} * 100$$

Utilización Efectiva (Base Disponible): Es el porcentaje de horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra efectivo. El indicador provee información sobre la eficacia operacional del proceso.

$$\% \text{ Utilización (B_Disponible)} = \frac{\text{Horas Efectivas}}{\text{Horas Disponibles}} * 100$$

Utilización Operativa: Es el porcentaje de horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra operativo.

El indicador provee información acerca de la capacidad de excedente que está disponible.

$$\% \text{ Ut. Operativa} = \frac{\text{Horas Operativas}}{\text{Horas Disponibles}} * 100$$

Factor de Utilización: Es el porcentaje de horas operativas en que el equipo se encuentra efectivo.

$$\% \text{ Factor de Utilización} = \frac{\text{Horas Efectivas}}{\text{Horas Operativas}} * 100$$

Deficiencias del método

La evaluación de un sistema minero a partir del cálculo mediante fórmulas explícitas y usando los indicadores de tiempo definidos por la norma ASARCO asumen las siguientes simplificaciones:

- Asumen el estado operacional más favorable (aquel en que todos los componentes del sistema minero están disponibles).
- No soporta las actividades de los componentes del sistema minero en forma explícito, por ejemplo:
 - No considera la carga de camiones por equipos de carga por ambos lados.
 - No considera las esperas en colas en locaciones de carga y descarga.
 - No considera las interferencias entre equipos de transporte.
 - No considera la saturación de ciclos de carga.

La norma ASARCO parece ser una alternativa válida de estimación para el largo plazo. Sin embargo, en corto plazo los eventos puntuales en períodos son importantes.

2.6.2 Mean Value Analysis

Para evaluar las demoras de los camiones en las operaciones de carga y descarga en un sistema minero pala-camión, es posible aplicar el método Mean Value Analysis (MVA) (Lavenberg y Reiser, 1980). Este método surge de la teoría de colas.

El método permite calcular:

- El número medio de trabajos en cada centro de trabajo.
- La capacidad media de respuesta temporal de cada centro de trabajo.
- La productividad media de un sistema de red de cola cerrada, dado un número determinado de trabajos.

Las características de la herramienta son las siguientes:

- MVA es una herramienta de evaluación de redes de colas cerradas para clientes multi-clase.
- Permite cuantificar productividades, utilización de centros de colas, esperas en colas, tiempos de ciclos en función del número de clientes en el sistema.
- MVA cuantifica el efecto de la saturación del sistema de redes de cola al variar el número de clientes en ella.
- Otorga una mejora a la mera estimación lineal de productividades.

Con este método es posible cuantificar de una manera relativamente rápida la productividad del sistema en función de la cantidad de camiones en el circuito, el tiempo de carga en los frentes de carga, el tiempo de descarga en los frentes de descarga y el factor de carga de los camiones.

El método refleja la saturación del sistema minero conforme aumenta el número de camiones en el sistema.

En la sección 13.1 se estudian dos ejemplos sencillos aplicando este método a un caso minero.

2.6.3 Simulaciones a eventos discretos

El objetivo de las simulaciones es intentar replicar el comportamiento de un sistema real mediante el modelamiento del comportamiento de los diferentes componentes que lo integran y sus interacciones. La simulación de procesos permite resolver cuestiones complejas para las cuales los métodos cuantitativos no son eficaces o no pueden aplicarse.

De acuerdo a (Shannon, 1975), simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Una breve explicación de conceptos dentro del contexto de la simulación es la descrita por (Banks, 1999). El autor define la simulación como la imitación de la operación de un sistema del mundo real en el tiempo. La simulación implica la generación de una historia artificial del sistema y la observación de esta historia artificial para sacar conclusiones sobre las características de funcionamiento del sistema real que se representa. Asimismo define conceptos clave dentro de la simulación:

- Un modelo es la representación de un sistema real.
- Un evento es una ocurrencia que cambia el estado del sistema.
- Las variables de estado del sistema son la recopilación de toda la información necesaria para definir lo que está sucediendo dentro del sistema a un nivel suficiente (es decir, para alcanzar el resultado deseado) en un punto dado en el tiempo.
- Un modelo de simulación de eventos discretos se define como uno en el que las variables de estado cambian sólo en aquellos puntos discretos en el tiempo en que ocurren los eventos.

Según (Hall, 2000), los pasos que todo proyecto de simulación debe tener son los siguientes:

1. Identificación del problema.
2. Declaración de los objetivos del proyecto.
3. Colección de preparación de los datos.
4. Formulación y construcción del modelo.
5. Verificación y validación del modelo.
6. Modificación y/o refinamiento del modelo.
7. Uso del modelo.
8. Aplicación de resultados.

De forma similar, las etapas en que todo estudio de simulación debe pasar según (Banks et al., 2000) se observan en la Figura 2-4:

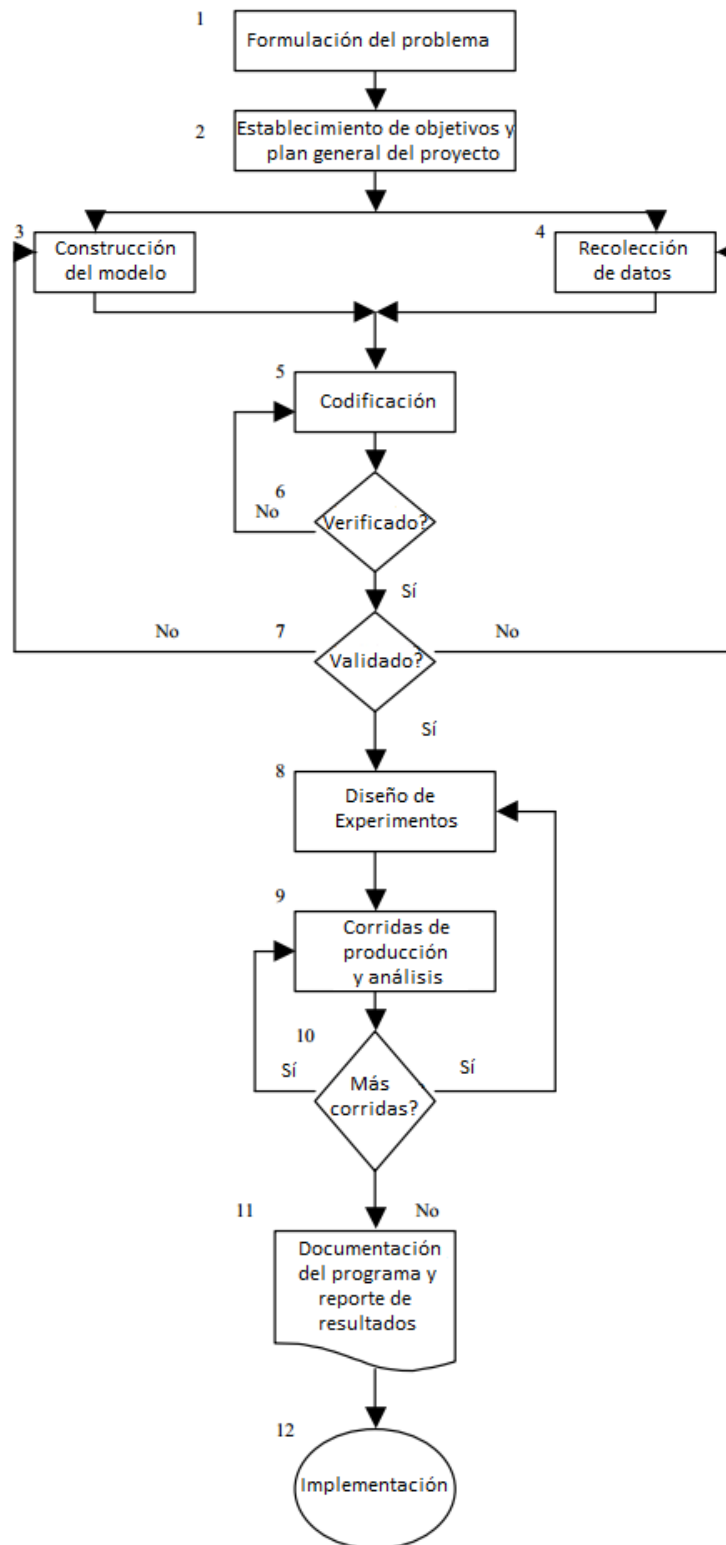


Figura 2-4: Pasos de un estudio de simulación

Con respecto al nivel de detalle del modelamiento del sistema, (Lobão y Porto, 1999) exponen que cuando un modelo es construido de forma compleja y detallada, se vuelve lento, difícil de comprender y mantener. Al mismo tiempo,

su confiabilidad decrece, puesto que el modelo necesita numerosos parámetros de calibración, difíciles de obtener en la realidad. Esta idea se ilustra en la Figura 2-5.

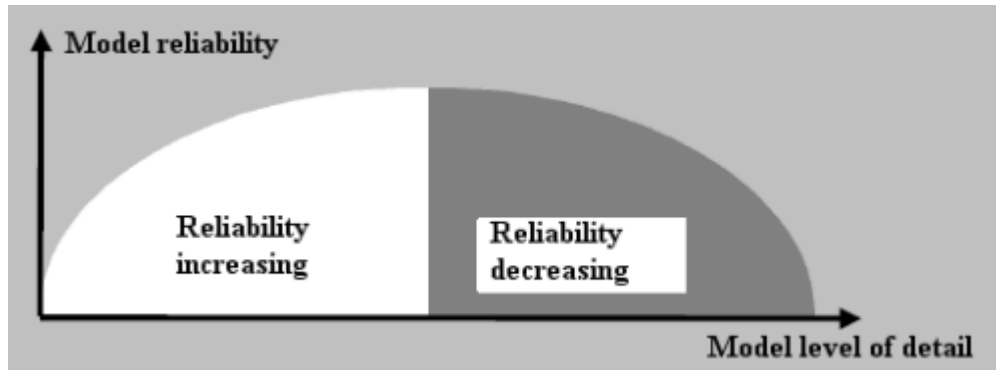


Figura 2-5: Grado de confiabilidad vs nivel de detalle de un modelo

Pese a todo lo anterior, la publicación de (Fioroni et al., 2008) reconoce que en ciertos sistemas a modelar no hay manera de evadir la simplificación de un procedimiento complejo sin pérdidas de precisión en los resultados del modelo. En algunos casos el sistema tiene procedimientos que involucran decisiones o elementos críticos que son muy importantes para el comportamiento del sistema. Además comenta que la presencia de un modelo de optimización en un modelo de simulación es un obstáculo para el modelador. Asimismo reconoce que los softwares de simulación de eventos discretos no están completamente diseñados para resolver problemas de optimización de una manera fácil y rápida.

La ventaja de este enfoque de evaluación es que toma en cuenta las actividades más relevantes involucradas en el proceso de manejo de materiales, desde el polígono que lo contiene hasta su depósito en su destino final.

Por otra parte, la desventaja de este método de evaluación de agendamiento es que es necesario desarrollar un sistema que sea capaz de sustentar las actividades operativas más relevantes involucradas en este proceso. Otra dificultad de este método tiene que ver con la caracterización de los parámetros de operación del sistema, los cuales modulan el desempeño micro del sistema en términos de tiempo y cantidades.

2.7 Heurísticas de despacho de camiones

Un despacho de camiones es la acción de asignar los frentes de carga a los cuales el camión debe viajar para ser cargado luego de realizar su descarga en algún frente de descarga o bien luego de ser reparado o mantenido en el taller de camiones. Un despacho de camiones es parte central de una operación minera puesto que dirige los ritmos extractivos de las frentes de carga y reasigna en forma dinámica los frentes de carga si éstos están disponibles o no.

A continuación se realiza una breve revisión por las heurísticas de despacho de camiones más aplicadas en minería a cielo abierto. Esta breve revisión está basada en la tesis doctoral de (Çetin, 2004).

Una heurística es un procedimiento para resolver un problema determinado. Es importante mencionar que una heurística no garantiza una solución óptima. Las heurísticas de despacho de camiones aquí presentadas se basan en optimizaciones locales.

La asignación de un camión a un equipo de carga es realizada en el instante inmediatamente posterior a que el camión queda libre luego de descargar su contenido de material en el punto de descarga, o bien cuando un camión pasa de estar no disponible a estarlo.

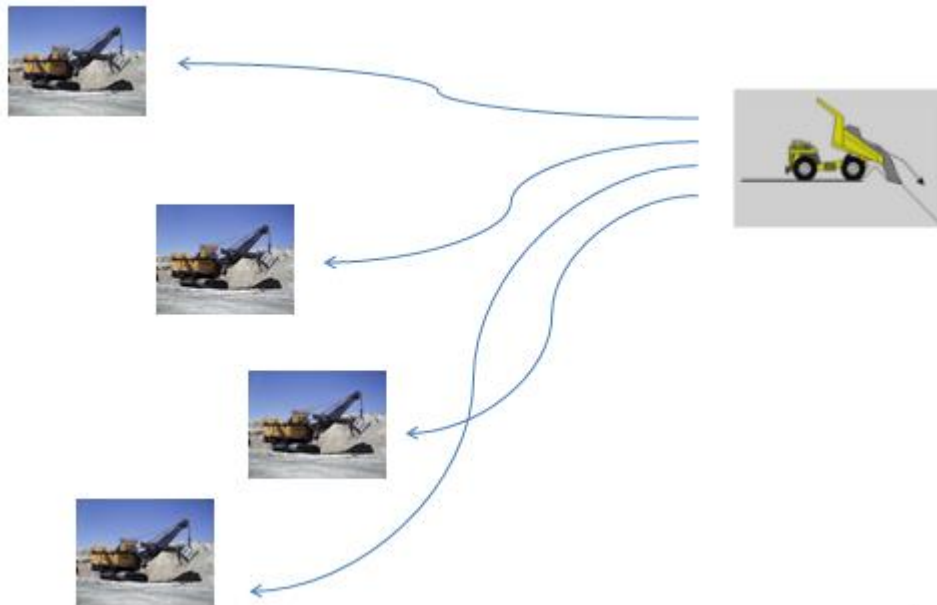


Figura 2-6: Opciones de despacho de camión libre a equipos de carga

De acuerdo a la revisión bibliográfica de Çetin las heurísticas de despacho más usadas en minería a cielo abierto son las que se describen a continuación.

2.7.1 Fixed Truck Assignment (FTA)

Descripción:

Al principio del turno cada camión es asignado a un solo circuito productivo (frente de carga, equipo de carga, frente de descarga). Esta asignación es mantenida durante todo el turno, salvo excepciones tales como la falla en algunas de los equipos de carga, en donde los camiones asignados a ese equipo de carga son reasignados.

Ventajas:

Fácil de entender e implementar.

Desventajas:

Con frecuencia se observan formación de colas de camiones en los equipos de carga.

2.7.2 Minimizing Shovel Production Requirement (MSPR)

Descripción:

A partir de metas productivas para cada equipo de carga (obtenidas a partir de un problema de optimización u otra aproximación), la asignación de un camión vacío en un punto de descarga se realiza al equipo de carga más atrasada en su meta productiva. La fórmula siguiente fue propuesta por (Tan y Ramani, 1992) y modificada por (Kolonja, 1992), que toma en consideración los camiones vacíos que están en camino al equipo de carga.

$$k : \operatorname{argmax}_i \{ (TNOW * PO_i / TSHIFT) - P_i \}$$

En donde:

<i>i</i>	Equipo de carga genérico.
<i>PO_i</i>	Producción objetivo del equipo de carga i.
<i>P_i</i>	Producción actual del equipo de carga i.
<i>TNOW</i>	Tiempo actual del turno.
<i>TSHIFT</i>	Duración temporal del turno.

Se toma en cuenta la capacidad total de camiones en una ruta equipo de carga-frente de descarga.

Ventajas:

Adecuada para minas que requieren un estricto control de mezclas en el producto final.

Desventajas:

No considera características de la red de transporte en su formulación. Formación de colas en equipos de carga mucho más atrasados.

2.7.3 Minimizing Truck Waiting Time (MTWT)

Descripción:

El camión es asignado al equipo de carga que resultará en el mínimo tiempo de espera de camión a este equipo de carga.

$$k : \arg \min_i \{ \max \{ SR_i - TR_i, 0 \} \}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
SR_i	Tiempo en que el equipo de carga está listo para cargar el camión actual.
TR_i	Tiempo de llegada del camión actual al equipo de carga i .

Desventajas:

No adecuado cuando el sistema posee pocos camiones y por tanto no existe espera de camiones en equipos de carga muy a menudo lo que puede llevar a obtener palas ociosas.

Recomendado para minas que no tienen requerimiento de mezclas ni los equipos de carga tienen metas de producción.

2.7.4 Minimizing Shovel Waiting Time (MSWT)

Descripción:

El camión es asignado al equipo de carga que esperará por menos tiempo a un camión. Tiende a la maximización de la utilización de los equipos de carga.

$$k : \arg \min_i \{ TR_i - SR_i \}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
SR_i	Tiempo en que el equipo de carga está listo para cargar el camión actual.
TR_i	Tiempo de llegada del camión actual al equipo de carga i .

Ventajas:

Tiende a balancear la producción de los equipos de carga.

Desventajas:

Lo anterior causa un decrecimiento en la productividad global del sistema.

Si los equipos de carga no esperan muy a menudo a camiones (sistemas con muchos camiones), es necesario reglas secundarias de desempate.

2.7.5 Minimizing Truck Cycle Time (MTCT)

Descripción:

El camión es asignado al equipo de carga el cual le otorgará el mínimo tiempo de ciclo esperado. El objetivo es maximizar la cantidad de ciclos de camión durante el turno.

$$k : \arg \min_i \{TCT_i\}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
TCT_i	Tiempo de ciclo del camión hacia el equipo de carga i .

Desventajas:

Se tenderá a asignar camiones a la pala con el tiempo de ciclo más pequeño. Descuida la forma de extracción de material en el origen, solo importando maximizar el material depositado.

No adecuado cuando existen restricciones de mezcla.

Ventajas:

Maximización del movimiento de material.

2.7.6 Minimizing Shovel Saturation or Coverage (MSC)

Descripción:

El camión es asignado a la pala que tiene mínimo grado de saturación entre los equipos de carga disponibles.

$$k : \arg \min_i \{(SR_i - TNOW) / TT_i\}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
SR_i	Tiempo en que el equipo de carga está listo para cargar el camión actual.
$TNOW$	Tiempo actual del turno.
TT_i	Tiempo medio de viaje desde el punto de despacho hasta el equipo de carga i .

2.7.7 Earliest Loading Shovel (ELS)

Descripción:

El camión es asignado a la pala que podrá cargar al camión en un tiempo esperado mínimo.

$$k : \arg \min_i \{ \max \{ TR_i, SR_i \} \}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
SR_i	Tiempo en que el equipo de carga está listo para cargar el camión actual.
TR_i	Tiempo de llegada del camión actual al equipo de carga i .

Desventajas:

Tiende a favorecer a asignar equipos de carga más cercanas. Esto es agravado si existen pocos camiones en el sistema.

Las distancias tienen un efecto significativo en la asignación.

2.7.8 Longest Waiting Shovel (LWS)

Descripción:

El camión es asignado al equipo de carga que más tiempo ha esperado por un camión.

$$k : \arg \max_i \{ \max \{ TR_i - SR_i, 0 \} \}$$

En donde:

i	Equipo de carga genérico.
SR_i	Tiempo en que el equipo de carga está listo para cargar el camión actual.
TR_i	Tiempo de llegada del camión actual al equipo de carga i .

Objetivo: Balancear producción entre equipos de carga.

Desventajas:

Si el sistema tiene muchos camiones, reglas secundarias deben ser implementadas.

Recomendado si el número de camiones en el sistema es pequeño.

2.7.9 Resumen de la revisión de heurísticas

Se mencionan las ventajas y desventajas encontradas de la sección:

Ventajas:

- Fáciles de entender.
- Fáciles de implementar.
- No requieren enorme potencia de cálculo.

Desventajas:

- Basadas en optimizaciones locales.
- No garantizan un óptimo global.
- Algunas no contemplan restricciones de mezcla.

Çetin afirma que no existe evidencia estadística significativa de una mejor heurística entre las presentadas. Sin embargo, también menciona que algunas heurísticas funcionarían mejor que otras si se cumplen condiciones específicas de operación (número de camiones operativos, número de equipos de carga operativos). La heurística de despacho a usar en el caso de estudio depende de la forma en que se lleva a cabo el despacho de camiones, pudiendo ser alguna de las presentadas o seguir alguna otra combinación de ellas.

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La siguiente sección tiene por objetivo describir los procesos de conceptualización e implementación del modelo de simulación de un sistema de manejo de materiales de una mina a cielo abierto genérica contenido dentro del software DSim. Actualmente, este software se encuentra en plena etapa de desarrollo y surge en el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile. La evolución del software consiste en dos etapas: una primera etapa de un desarrollo de un modelo en el software en Promodel y posteriormente su traducción y mejora soportada en una plataforma de desarrollo independiente programado en el lenguaje de programación Python y que se utiliza de los módulos de visualización VPython y del módulo de simulación de eventos discretos SimPy. La primera etapa fue desarrollada íntegramente por el autor de este documento, mientras que la segunda etapa fue un desarrollo conjunto entre Nelson Espejo B., desarrollador principal, Nelson Morales V., director del laboratorio de Planificación Minera Delphos y el autor de este trabajo.

3.1 Dinámica operacional de un sistema de manejo de materiales

La presente sección describe una forma de modelar la dinámica operacional de un sistema de manejo de materiales. Para ello, se describen conceptos centrales a continuación.

Se entiende por **estado operacional** a la descripción actual del sistema de manejo de materiales en un instante de tiempo dado.

Un estado operacional totalmente definido debe especificar lo siguiente:

- Estados de los componentes operacionales.
- Ubicación espacial de los componentes operacionales.
- Cantidad y calidad de material de los polígonos de extracción.
- Estado del polígono de extracción.

Se entiende por **evento operacional**, aquel evento que provoca un cambio de estado operacional en el sistema de manejo de materiales. Estos eventos son:

- Operación/ausencia de operación de descarga a chancador primario.
- Operación/ausencia de operación de un equipo de carga.
- Operación/ausencia de operación de un equipo de transporte.
- Habilitación/no habilitación de un nuevo frente de carga (por operación de tronadura y por agotamiento de material del frente respectivamente).

La **naturaleza de ocurrencia de eventos operacionales** varía desde eventos de ocurrencia dentro de un intervalo de tiempo determinado a eventos totalmente inesperados.

- Eventos operacionales de ocurrencia dentro de un intervalo de tiempo: Algunos de estos eventos operacionales se tiene la certeza que ocurrirá, sin embargo no se conoce el momento exacto de su ocurrencia. Por ejemplo, un frente de carga, dada la poca cantidad de material contenido, se espera que se agote conforme avance el presente turno. Sin embargo, el momento exacto de su agotamiento será función de la evolución de los estados operacionales del sistema.
- Eventos operacionales totalmente inesperados: Por otro lado, existen eventos operacionales que no son completamente esperados, pero se intuye que ocurrirán debido a alguna ley de predicción de fallas (si existiera) o falla completamente inesperada.

Independiente de la naturaleza de ocurrencia de los eventos operacionales, siempre se debe contar con un plan para reaccionar a estos eventos. Una de las grandes dificultades que tiene un simulador de un sistema de movimiento de material es la reasignación de componentes operacionales dado cualquier cambio de estado operacional.

Se entiende por **reasignación operacional** a todos los cambios que se realizan en la operación minera frente a algún evento operacional. Las reasignaciones operacionales son las siguientes:

- Reasignación de equipo de carga a frentes de carga.
- Reasignación del número de equipos de transporte a equipos de carga.
- Cambio de destinos predefinidos de material por parte de un equipo de transporte.

Es importante mencionar que las reasignaciones operacionales son función tanto del evento operacional surgido como del estado operacional inmediatamente anterior al evento operacional.

Es importante indicar, a pesar de ser evidente, que una reasignación operacional cambia el estado operacional una vez completada su acción. Operaciones mina debe lidiar turno a turno con estos eventos operacionales y debe realizar las correspondientes reasignaciones operacionales, las cuales deben estar alineadas con al estado operacional anterior y actual.

A veces no siempre es claro cuál es la mejor reasignación operacional dado un estado operacional previo y el evento operacional que desencadena el cambio de estado. Dado los múltiples objetivos del sistema minero pueden existir muchas opciones de asignaciones razonablemente plausibles. La correcta evaluación de las posibles reasignaciones operacionales ayuda a operaciones

mina a la elección de una reasignación operacional de acuerdo a sus intereses actuales. Esta evaluación se puede realizar por medio de simulaciones y en combinación (o no) de problemas de optimización de asignación de componentes mineros.

Las reasignaciones operacionales se clasifican de acuerdo al grado de complejidad que necesitan para cambiar el estado operacional actual al estado final deseado en las siguientes:

- Simples: Para pasar del estado A al B el sistema necesita pasar por un único estado. Ejemplo: Cambio de destino de un frente de carga activo.
- Complejas: Para pasar del estado A al B el sistema necesita pasar por múltiples estados. Ejemplo: Cambios secuenciales de posturas de equipos de carga a frentes de carga.

3.2 Parámetros operacionales

Se entiende como parámetros operacionales los que describen alguna propiedad de una acción operacional. De acuerdo a la forma de su modelamiento se clasifican en deterministas o estocásticos.

En este trabajo, los parámetros operacionales son los descritos en la Tabla 3-1.

Parámetro	Descripción
Factor de carga	Cantidad de material que el equipo de carguío carga en el camión.
Tiempo de carga	Tiempo entre que el equipo de carguío emplea en cargar el camión. No incluye tiempos de aculatamiento ni esperas una vez posicionado el camión.
Tiempo de aculatamiento carga	Tiempo que emplea el camión desde que entra a la locación de carga hasta posicionarse en el punto de carga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
Tiempo de descarga	Tiempo que emplea el camión en descargar su carga actual. No incluye tiempos de aculatamiento en descarga.
Tiempo de aculatamiento descarga	Tiempo emplea el camión desde que entra a la locación de descarga hasta posicionarse en el punto de descarga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
Tiempo de viaje	Tiempo de viaje entre locaciones de carga y descarga. Se distingue entre tiempos de viaje en estado cargado y descargado.

Tabla 3-1: Descripción de parámetros operacionales

3.3 Interpretación de la incertidumbre operacional en el modelo de simulación

La actual sección discute la interpretación de la incertidumbre operacional en la conceptualización del modelo de simulación de un sistema de manejo de materiales.

3.3.1 Tipos de incertidumbre operacional

En la sección actual se realiza la identificación de los tipos de incertidumbre operacional presentes en un sistema de manejo de materiales en una faena a cielo abierto. Se identifican las siguientes fuentes de incertidumbre operacional:

- Asociadas a los parámetros operacionales.
- Asociadas a los eventos operacionales.
- Asociadas a las reasignaciones operacionales.

La incertidumbre operacional asociada a parámetros operacionales tiene relación con los tiempos, velocidades y capacidades de los componentes mineros. La asociada a eventos operacionales tiene que ver con los eventos de no disponibilidad de los componentes mineros y finalmente la asociada a la reasignación operacional tiene relación con la estrategia de operación ante cambios de no disponibilidad de los componentes mineros. En la Figura 3-1 se muestra esquemáticamente los tipos de incertidumbre operacional.

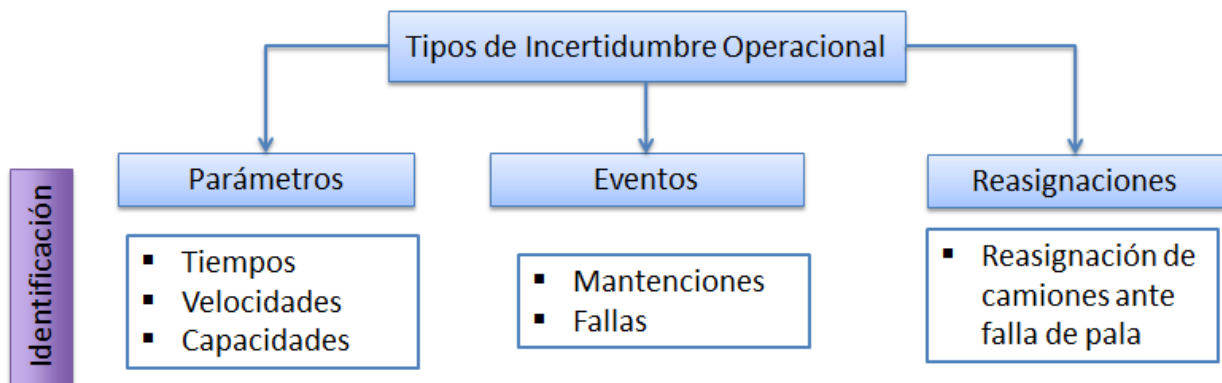


Figura 3-1: Tipos de incertidumbre operacional

En las secciones siguientes, se describe en detalle cada uno de los tipos de incertidumbre operacional.

3.3.2 Incertidumbre operacional asociada a parámetros operacionales

Al identificar los tipos de incertidumbre operacional presentes en el sistema de manejo de materiales, el de más directa identificación tiene que ver con la asociada a los parámetros operacionales. La forma de caracterizar este tipo de incertidumbre operacional es mediante un estudio estadístico de datos a partir de los datos históricos de la faena minera en estudio.

Las distribuciones usadas normalmente para modelar cada uno de los parámetros operacionales son las siguientes (Torkamani, 2013):

- Weibull: Tiempo entre fallas de componentes mineros.
- Gamma: Tiempo entre fallas de componentes mineros.
- Triangular: Distribución de velocidades de camiones, tiempo de carga de camiones, tiempo de descarga de camiones y factor de carga de camiones.
- Normal: Distribución de velocidades de camiones.

3.3.3 Incertidumbre operacional asociada a eventos operacionales

Los componentes mineros de un sistema de manejo de materiales están sujetos a interrupciones en su operación efectiva. La naturaleza de esta interrupción en términos fundamentales tiene que ver con:

- Pérdidas operacionales físicas.
- Pérdidas operacionales de servicio.
- Mantenciones.
- Fallas.
- Reasignaciones operacionales.

3.3.3.1 Eventos por pérdidas operacionales físicas

Dentro del sistema de manejo de materiales, existen tiempos de espera debidas a las interacciones físicas de los componentes mineros en la operación de transporte de material. Estos tiempos son inherentes al sistema de manejo de materiales. No considerarlos resultaría en una sobreestimación del desempeño del sistema. Las pérdidas operacionales físicas identificadas se desglosan de acuerdo a las etapas de ciclo de transporte de un camión y se enumeran a continuación:

- Carga:
 - Espera preaculatamiento en carga.
 - Espera aculatamiento en carga.
 - Espera por carga.
 - Espera por salida.

- Descarga:
 - Espera preaculatamiento en descarga.
 - Espera aculatamiento en descarga.
 - Espera por descarga.
 - Espera por salida.
- Viaje en carga/ Viaje en descarga:
 - Limitación de velocidad por camión antecesor.
 - Detención debido a camión antecesor.
 - Reducción de velocidad por camión viajando en dirección contraria.

Una manera de caracterizar la incertidumbre operacional asociada a las pérdidas operacionales físicas es mediante un modelo de simulación por eventos discretos. Es importante mencionar que la incertidumbre operacional asociada a pérdidas operacionales físicas es función de la manera en que equipos de carga y transporte operan e interactúan, a diferencia de la incertidumbre operacional asociada a los parámetros operacionales, la cual es completamente caracterizada por las distribuciones de probabilidad obtenidas a partir de datos históricos.

3.3.3.2 Eventos por pérdidas operacionales de servicio

Estas pérdidas operacionales tienen que ver con la ausencia de operación de equipos de carga y de transporte debido a acciones operacionales de servicio que son igualmente necesarias de llevar a cabo para que ocurra el manejo de material. Se enumeran de acuerdo al tipo de carga o transporte asociado:

- Equipo de transporte:
 - Abastecimiento de petróleo.
- Equipos de carga:
 - Abastecimiento de petróleo (si aplica).
 - Limpieza de frente de carga.
 - Cambio de módulo equipo de carga.

Dependiendo de la naturaleza de la pérdida operacional de servicio será el nivel de dificultad de modelar su fenómeno. Por simplicidad, este tipo de incertidumbre en la literatura es generalmente modelado según el esquema TBF/TTR (Tiempo entre fallas y Tiempo para reparar, ver sección 3.3.3.4).

3.3.3.3 Eventos por mantenimientos

Una mantención de un componente minero se caracteriza por su control total tanto de su tiempo de inicio como de su duración en tiempo. (Sin embargo, existe una variación de esta definición en donde la duración del tiempo de

mantención está sujeta a variabilidad). El efecto de las mantenciones es la no operación del componente minero a mantener.

Podría existir un cierto tipo de flexibilidad en la elección del tiempo de inicio de una mantención, el cual puede ser elegido de forma conveniente en función de los sucesivos cambios de estado operacionales del sistema a lo largo del tiempo. En efecto, en la realidad un equipo tiene una mantención agendada a cumplir dentro de un intervalo de tiempo, pero su tiempo de inicio puede variar para aprovechar estados del sistema que menos impacten al desempeño total. Por ejemplo, un camión que necesita ser mantenido por 2 horas en un turno determinado tenderá a iniciar su mantención al mismo tiempo que se realiza la operación de tronadura en la mina en vez de elegir el tiempo de mantención dentro de un intervalo de tiempo en donde la operación de tronadura no es desarrollada.

3.3.3.4 Eventos por fallas

Una falla de un componente minero se caracteriza tanto en el desconocimiento del tiempo de inicio y de la duración total de la falla. Su efecto es la no operación del componente minero en falla.

La forma tradicional de modelar la incertidumbre debida a fallas es asumir que los componentes del sistema poseen una ley de transición de estados dada por una distribución de tiempo entre fallas y una distribución de tiempo para reparar. Este modelo de fallas se denota como modelo TBF/TTR.

Esta forma de modelar este tipo de incertidumbre posee una serie de supuestos.

- Asume la existencia de esta ley, lo que es cuestionable.
- Integra todos los modos de falla en una única ley de transición entre estados en operación y falla.
- Asume que la forma de fallar tiene que ver con el tiempo y no con alguna otra variable como por ejemplo la cantidad de cargas o baldadas realizadas.

Como comentario, existen publicaciones que modelan los estados de operación y de no operación entre componentes mineros solamente usando el esquema TBF/TTR. Sin embargo, no se hacen cargo de las mantenciones programadas de los componentes mineros ni de las pérdidas operacionales de servicio. Se puede subentender que éstas publicaciones integran la incertidumbre en mantenciones programadas, las fallas y las pérdidas operacionales de servicio en un solo modelo TBF/TTR. Esto es una aproximación a la realidad, pero en estricto rigor debieran ser fenómenos modelados en forma independiente. Esta forma de modelamiento asume una total independencia entre los intervalos de no operación de los componentes mineros, hecho que es falso cuando se habla en términos de intervalos de tiempo asociados a mantenciones. En efecto, las mantenciones de los componentes mineros se agendan de manera de tratar

de disminuir el efecto negativo de superposición entre ellos, por lo que si se usara un modelo TBF/TTR integrando mantención y fallas, el efecto de superposición entre tiempos que corresponden a mantenciones se manifestaría en algunas réplicas de la simulación, sesgando las estadísticas de desempeño del plan, y por consiguiente subestimando el movimiento total con respecto al real.

3.3.4 Incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales

Una reasignación operacional es realizada ante un cambio de estado en el sistema minero. La reasignación entrega el nuevo estado operativo ante el cambio operacional que lo desencadenó. La aplicación de esta reasignación es por sí misma un evento operacional. Es importante notar la diferencia sutil entre reasignación y evento operacional.

La forma de integrar la incertidumbre asociada a las reasignaciones operacionales es disponer de reglas claras de reasignación de componentes mineros. Una forma de realizar esto es definir la reasignación mediante un problema de optimización lineal, el cual se resuelve cada vez que ocurre un cambio de estado en el sistema. Sin embargo, surgen nuevos aspectos a resolver, los que se listan a continuación:

- Cuestionamiento al problema de reasignación: Generalmente las reasignaciones mineras tienen que ver con el criterio de una persona o grupo de ellas, el cual no siempre es el mismo o necesariamente el mejor. Reemplazar este criterio humano por un criterio automático debe necesariamente pasar por una etapa de validación del asignador automático y que las reasignaciones propuestas tengan sentido.
- Infactibilidad del problema: Puede suceder que la reasignación operacional resulte infactible. Una posible forma de abordar esto es ir relajando las restricciones no respetadas y volver a resolver el problema.
- Problemas prácticos de integración entre simulador y el problema de asignación: Algunos softwares comerciales no cuentan con la flexibilidad deseable para integrar de manera transparente el problema de asignación y la simulación.
- Forma de realizar la transición entre estado actual y estado reasignado: Los problemas de reasignación entregan el estado final de reasignación, no entregando información acerca de la mejor manera de realizar los movimientos de los componentes mineros para alcanzar la nueva reasignación.

Con respecto al punto de las reasignaciones mineras que se efectúan mediante un criterio de una persona o grupo de personas, se sabe que como seres humanos se posee un profundo deseo y necesidad de ser consistentes con nuestro comportamiento respecto a nuestras creencias adquiridas en el

pasado. A veces las personas se ven enfrentadas a escenarios complicados en donde no se tiene el tiempo de recolectar y procesar toda la información para tomar la mejor decisión. Ante esta situación, las personas prefieren recordar qué decisión se tomó en el pasado, y tienden a replicarla en el escenario complicado actual. La persona piensa, "Esta situación es parecida a aquella, y yo decidí realizar tal cosa entonces." Por lo tanto, se procede a aplicar la misma respuesta anterior. Por ejemplo, si se necesita tomar un microbús a un lugar que está en la misma zona de la ciudad en donde queda la universidad donde estudia, se escogerá el mismo microbús que normalmente se usa para ir a la universidad, en vez de conseguir un mapa para ver si eventualmente se ahorrará tiempo tomando un microbús diferente.

Generalmente, esto es favorable sólo desde el punto de vista del tiempo de procesamiento de la decisión. En efecto, probablemente se gastaría más tiempo mirando el mapa del que le tomaría viajar por un microbús con una ruta ligeramente más larga. Sin embargo, si este tiempo de procesamiento de la decisión fuera mínimo, la decisión cambiaría y se optimizaría el problema. El comportamiento descrito anteriormente, unido a las diferentes experiencias y criterios de distintas personas, torna complejo el modelamiento de las reasignaciones operacionales de componentes mineros.

3.3.4.1 Problema de asignación de componentes mineros

A pesar de las dificultades que involucra la asignación de componentes mineros, este asunto se puede abordar proponiendo un problema de optimización. Con respecto a la naturaleza del este problema, éste varía en complejidad, pudiendo solo ser capaz de reasignar todos o solo algunos de los tipos de componentes mineros involucrados en el sistema.

En la literatura existen diferentes problemas de asignación de componentes mineros que se diferencian en:

- La naturaleza de la función objetivo:
 - Maximizar finos del metal de interés.
 - Maximizar beneficio.
 - Minimizar costos de minado.
 - Maximizar movimiento de material total.
 - Minimizar traslados de equipos de carga.
- Naturaleza de las restricciones:
 - Restricciones de saturación de chancado.
 - Restricciones de mezcla.
 - Restricciones de capacidad.
- Complejidad de la reasignación:
 - Solo reasignación de camiones a circuitos productivos.
 - Reasignación de equipos de carga a frentes de carga y camiones a circuitos productivos.

En la sección 13.2 y 13.3 se proponen dos problemas de reasignación de componentes mineros. El primero asigna el número de camiones a circuitos productivos mientras que el segundo asigna equipos de carga a frentes de carga y número de camiones a circuitos productivos.

La forma de caracterizar los tipos de incertidumbre operacional es la siguiente:
 Para Parámetros Operacionales: Ajuste de distribuciones de probabilidad
 Para Eventos Operacionales: Modelos de indisponibilidad de componentes mineros
 Para Reasignaciones Operacionales: Simulación de escenarios.

Un esquema global de la identificación y caracterización de los tipos de incertidumbre operacional se muestra en la Figura 3-2.

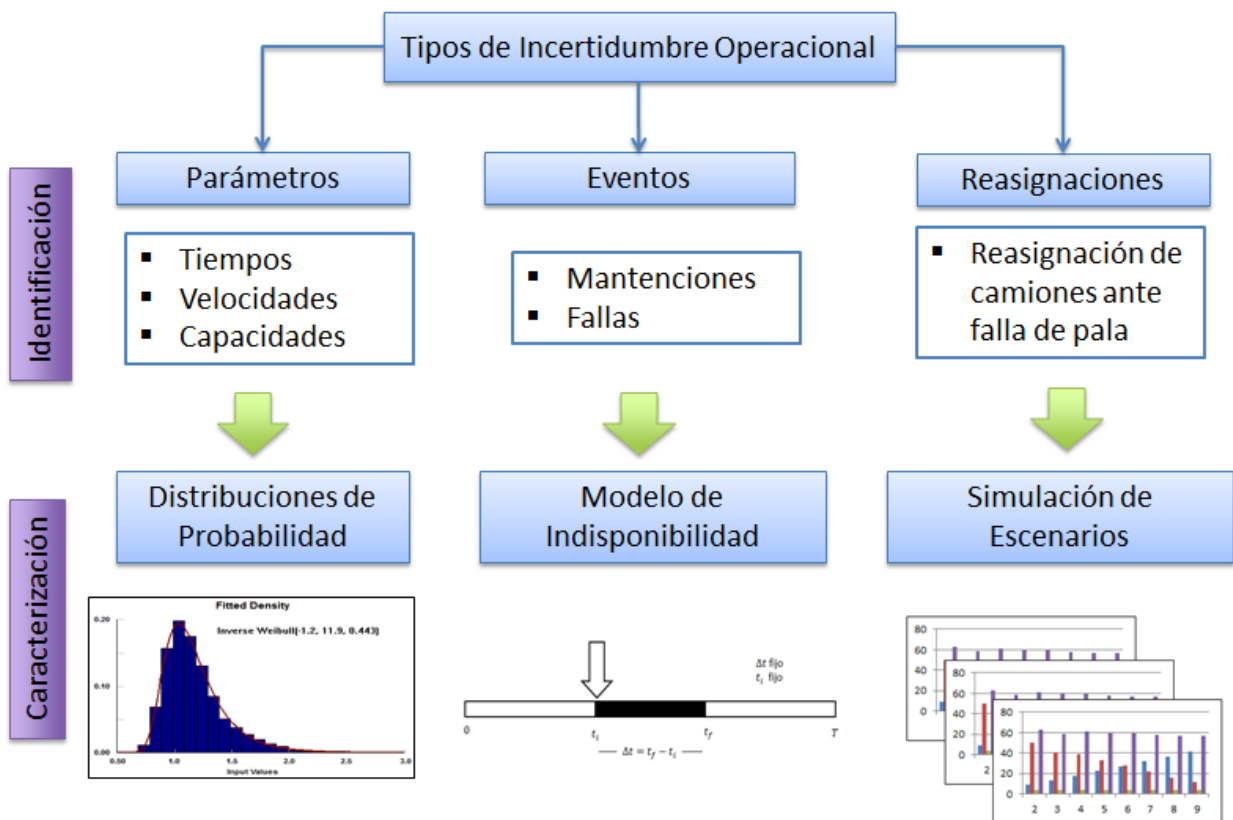


Figura 3-2: Esquema de evaluación de los tipos de incertidumbre operacional

3.4 Formulación del problema

Se necesita estudiar el impacto de los tipos de incertidumbre operacional en los resultados de los planes mineros a corto plazo en faenas a cielo abierto.

3.5 Objetivo

Generar un modelo de simulación que represente la operación minera de un sistema de manejo de materiales de una faena a cielo abierto.

3.6 Alcances

- Las reasignaciones operacionales de equipos mineros debido a cambio de eventos operacionales involucran solamente un cambio de asignación del número de camiones a equipos de carga y no un cambio de equipos de carga a frentes de carga.
- Cada equipo de carga posee una lista de frentes de carga que extraerá en forma secuencial a lo largo de la simulación. Esta lista de frentes de carga está predefinida. Se considera que para cualquier frente de carga exista solamente un equipo de carga que lo extrae, para evitar conflictos de asignación concurrente.
- El movimiento de los equipos de carga a lo largo de los frentes de carga predefinidos ocurre en forma estrictamente secuencial y se produce cada vez que un frente de carga ve agotado su material.
- Las detenciones operacionales, mantenciones y fallas de los equipos de carga, equipos de transporte y chancador primario son conocidas de antemano de forma de validar los modelos de incertidumbre de los parámetros operacionales obtenidos de datos reales.

3.7 Límite de batería

El límite de batería define los límites entre los cuales se mueve el modelo de simulación. Generalmente es un subconjunto de la cadena de producción minera.

El modelo de simulación del sistema de manejo de materiales de una faena minera se inserta desde la extracción de material desde las frentes de carga hasta la descarga de material en las frentes de descarga.

3.8 Desarrollo modelo conceptual

El modelo conceptual permite entender el sistema a modelar para que posteriormente sea implementado en un software de simulación. El modelo conceptual describe a continuación.

3.8.1 Componentes mineros

Se describe cada uno de los componentes mineros del sistema, los que se enumeran a continuación:

- Frente de carga.
- Frente de descarga.
- Equipo de carguío.
- Equipo de transporte.
- Camino.
- Enlace.

3.8.1.1 Frente de carga

Un frente de carga es el lugar físico en donde se realiza la operación de carguío de material usando para ello un determinado equipo de carguío y equipo de transporte. Cada frente de carga debe poseer entre 1 a 2 trayectorias de aculatamiento. El modelamiento de un frente de carga tiene las siguientes características:

- Polígono.
- Destino primario.
- Destino secundario.
- Cantidad de material.

La descripción de destinos primario o secundario es realizada debido a que no siempre un material que se desea enviar su destino primario, logra ser enviado hacia allá efectivamente debido al fenómeno de acumulación de camiones en el frente de descarga. Así, cuando existe un cierto número de camiones en el área de descarga, los camiones que se dirigen hacia allá cambian en forma dinámica su destino hacia su destino secundario.

3.8.1.2 Frente de descarga

Un frente de descarga es el lugar físico en donde se realiza la operación de descarga por parte de un camión de extracción.

Cada frente de carga debe poseer entre 1 a 2 trayectorias de aculatamiento. Existen dos tipos de frente de descarga: tipo simple y tipo chancado. El frente de descarga del tipo simple no permite descargas simultáneas de dos camiones. El frente de descarga del tipo chancado tampoco permite la descarga simultánea de camiones. Además posee otra restricción: El material descargado por un camión tiene un tiempo de chancado que debe ser completado para que otro camión pueda descargar.

3.8.1.3 Equipos de carga

Los equipos de carga son ubicados en alguna de las frentes de carga disponibles en la red de transporte de material. Cada equipo de carga posee de forma predefinida una lista de frentes de carga los que debe extraer en forma secuencial.

Cada una de estas componentes tiene características que la definen, que fueron determinadas mediante un estudio de datos históricos de faena. Las características de cada equipo de carga son:

- Tiempo de carga.
- Factor de carga.
- Tiempo de acuatamiento.

3.8.1.4 Camión

Los camiones tienen por objetivo transportar material desde las frentes de carga y transportarlas a alguna frente de descarga. Los camiones se mueven siguiendo la lógica autónoma más relevante del sistema.

El movimiento no aislado del camión cumple las siguientes reglas de movimiento:

- El camión reduce su velocidad en un porcentaje definido de la velocidad aislada en el tramo que recorre, si encuentra a un camión circulando en dirección contraria dentro de su burbuja de seguridad, de radio definido.
- Un camión no puede adelantarse a otro camión que circula en su misma dirección.
- El modelo de movimiento del camión en forma aislada se basa en una matriz de doble entrada, en donde la velocidad aislada del camión es función del estado de carga del camión (cargado o descargado) y de la pendiente que recorre (bajando, subiendo, y horizontal). Las pendientes en subida y bajada deben poseer una pendiente por sobre 4% en valor absoluto para que sean consideradas en esa condición.
- Disminuye su velocidad un cierto porcentaje de la velocidad aislada al encontrarse con un camión en un sentido contrario, si es que se encuentra dentro de su burbuja de seguridad, de radio definido.
- Respeta la lógica de intersecciones del sistema, tanto intersecciones en ruta como trayectorias de acuatamiento en carga y descarga.
- El camión también soporta las necesidades de mantenciones, por lo que si requiere de alguna mantención luego de descargar su carga en algún frente de descarga, se dirigirá al taller de camiones para ser mantenido.

3.8.2 Componentes de la red de transporte

A continuación se presenta una instancia de red de transporte de material de una faena minera real. Los componentes de la red de transporte de material son los siguientes:

- Caminos.
- Enlaces.
- Trayectoria de acuatamiento.

Mediante la Figura 3-3 se explican los diferentes componentes de la red de transporte de material, en las siguientes secciones.

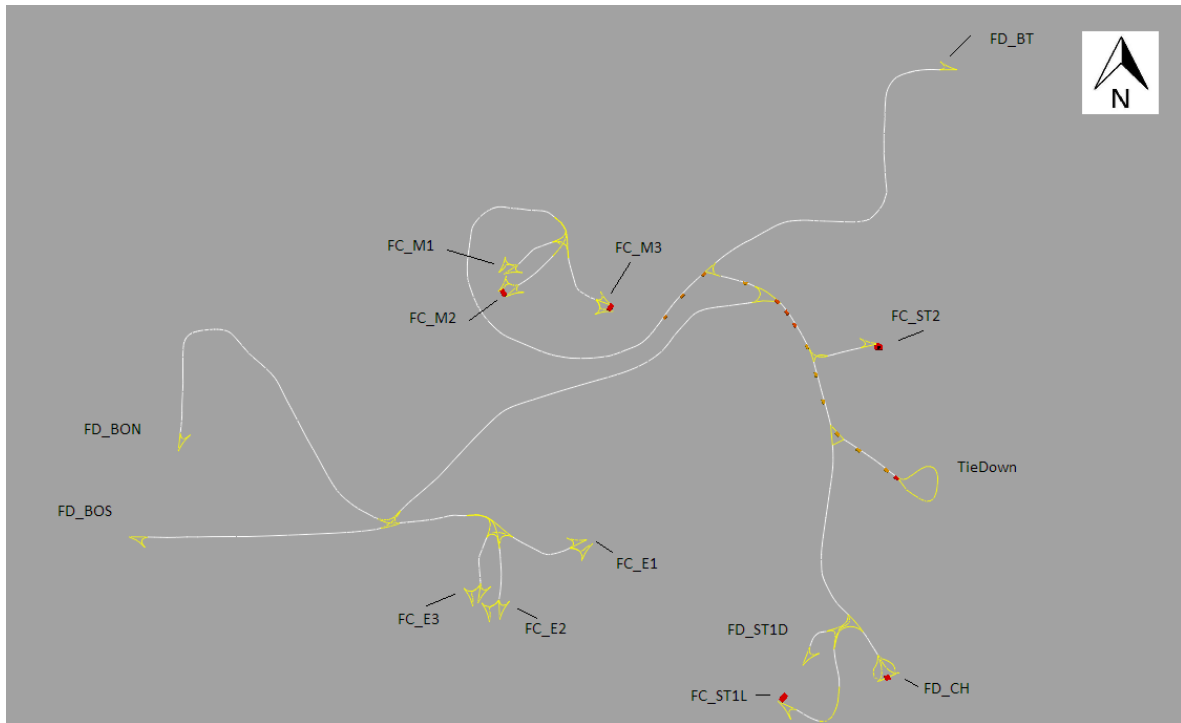


Figura 3-3: Red de transporte de material

3.8.2.1 Caminos

Los caminos modelan los segmentos de la red de transporte que **no son intersectados** por otros segmentos. En la Figura 3-3 son representados por los segmentos de color blanco.

Cada camino se describe por un conjunto de puntos de coordenadas en 3 dimensiones. Internamente el software calcula los caminos con ambos sentidos. Por lo tanto, al realizar la descripción de un camino se debe describir el eje del camino. Se distinguen dos tipos de caminos:

- Caminos terminales: Caminos que desembocan en frentes de carga o descarga.
- Caminos intermedios: Caminos que no desembocan ni en frente de carga ni en frentes de descarga.

Para cada frente de carga o descarga, debe haber uno y solo un camino que desemboque en la frente.

3.8.2.2 Enlaces

Los enlaces modelan los segmentos de la red de transporte que **sí son intersectados** por otros segmentos. En la Figura 3-3 son representados por los segmentos de color amarillo. Cada enlace se describe por un conjunto de puntos de coordenadas en 3 dimensiones.

3.8.2.3 Trayectoria de aculatamiento

La trayectoria de aculatamiento modelan los movimientos de los camiones en la frente de carga o frentes de descarga. En la Figura 3-3 son representados por los segmentos de color amarillo terminales a algún camino.

El software internamente posee una plantilla predefinida de las trayectorias de aculatamiento posibles, las cuales se dibujan al final de cada camino terminal.

3.8.3 Modelos ausencia de producción de componentes mineros

Un modelo ausencia de operación de un componente minero consiste en la manera en que se generan los intervalos de tiempo en que el componente minero está en ausencia de producción.

En este modelo de simulación, las actividades que involucran ausencia de operación son todas aquellas que inhabilitan al componente minero a realizar operaciones de producción efectiva.

Para los equipos de carga, las siguientes actividades se consideran en ausencia de operación:

- Mantenciones.
- Fallas.
- Cambios de turno.
- Colaciones.
- Detenciones por tronadura.
- Traslados de frente.
- Limpieza de cancha.
- Traslados en el mismo frente de carga (cambio de módulo).
- Traslados a taller (si corresponde).
- Llenado de estanque de combustible.
- Inspección de componentes.

Para los camiones, las siguientes actividades se consideran en ausencia de operación:

- Mantenciones.
- Fallas.
- Cambios de turno.
- Colaciones.
- Detenciones por tronadura.

- Traslados a taller.
- Llenado de estanque de combustible.
- Inspección de componentes.

Dada la enorme complejidad de los eventos que involucran estados de ausencia de producción en equipos de carga y transporte, se proponen los siguientes dos modelos:

- Fijo: El tiempo en ausencia de producción es fijado de antemano, tanto en un tiempo de inicio como en su duración. Como el tiempo de inicio es fijado de antemano, la forma de definir los tiempos iniciales en ausencia de producción siguen el criterio de superposición mínima entre tiempos en ausencia de producción de equipos de carga. Ver Figura 3-4.

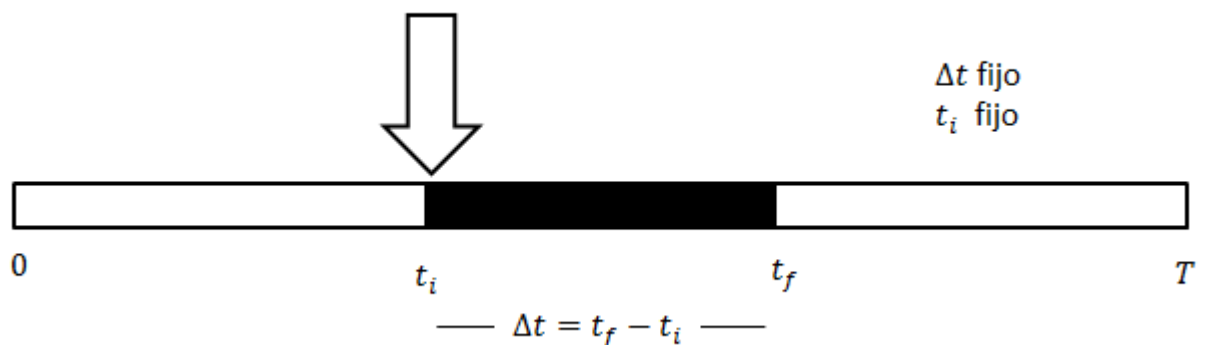


Figura 3-4: Modelo fijo de ausencia de producción

- Variable: El tiempo en ausencia de producción es fijo en términos de duración pero aleatorio en términos de tiempo de inicio. La variable aleatoria que determina el tiempo de inicio corresponde a una distribución uniforme de parámetros 0 y el tiempo del periodo menos el tiempo en ausencia de producción (los parámetros de la distribución uniforme aseguran de que el tiempo en ausencia de producción se produzca dentro del periodo de tiempo actual). Ver Figura 3-5.

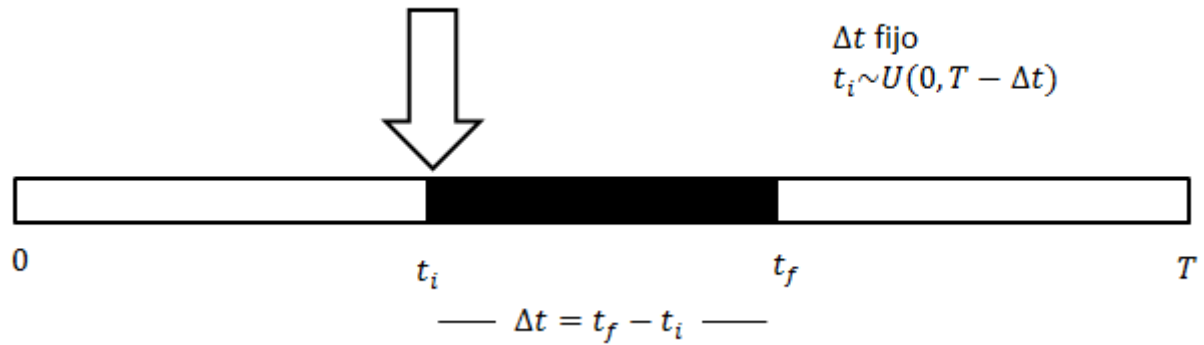


Figura 3-5: Modelo variable de ausencia de producción

En ambos modelos de generación de tiempos en ausencia de producción se cumple lo siguiente:

- Para cada periodo, el tiempo en ausencia de producción es igual en ambos equipos.
- Para cada periodo, el tiempo en ausencia de producción se compone de un intervalo de tiempo continuo.

La única diferencia entre los dos modelos es el tiempo inicial en el cual comienza el tiempo en ausencia de producción.

Para camiones, se utiliza el modelo del tipo variable, mientras que para los equipos de carga, ambos modelos son usados.

3.8.4 Lógica de Operación

Los siguientes diagramas de flujo representan en forma simplificada la lógica de operación de los camiones y los equipos de carga.

Notación:

- TBF: Tiempo entre fallas.
- TTR: Tiempo para reparar.
- T_a: Tiempo actual.

3.8.4.1 Camión

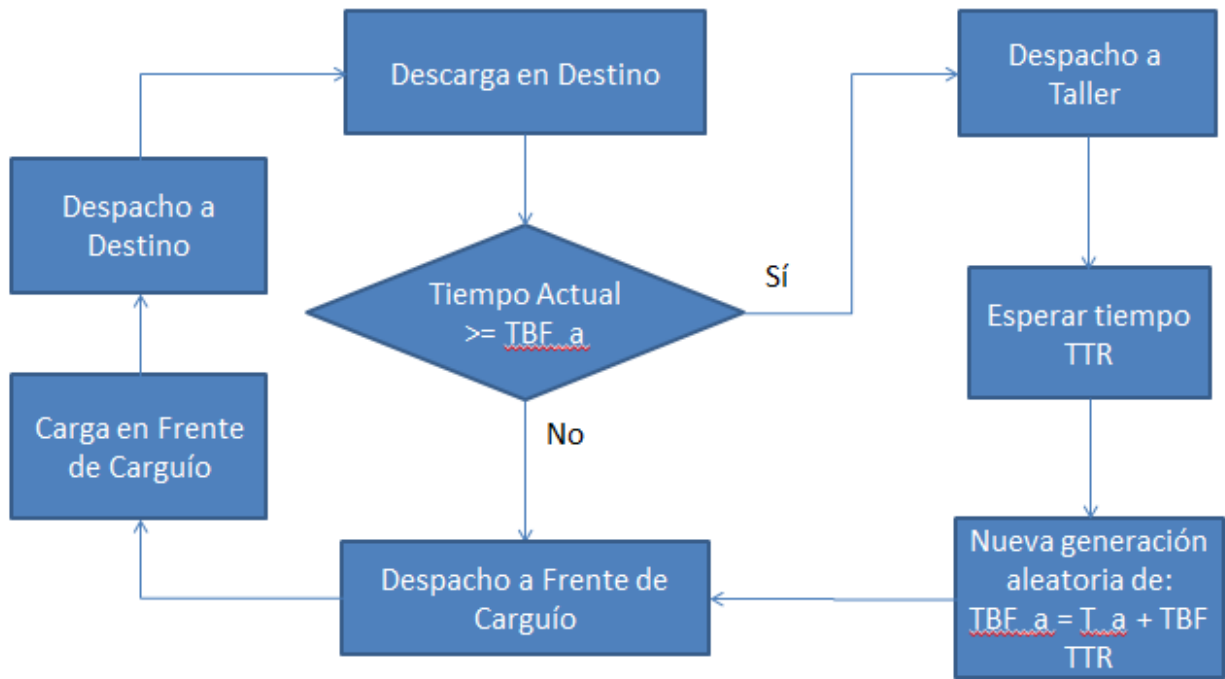


Figura 3-6: Lógica de operación general camión

3.8.4.2 Equipo de carga

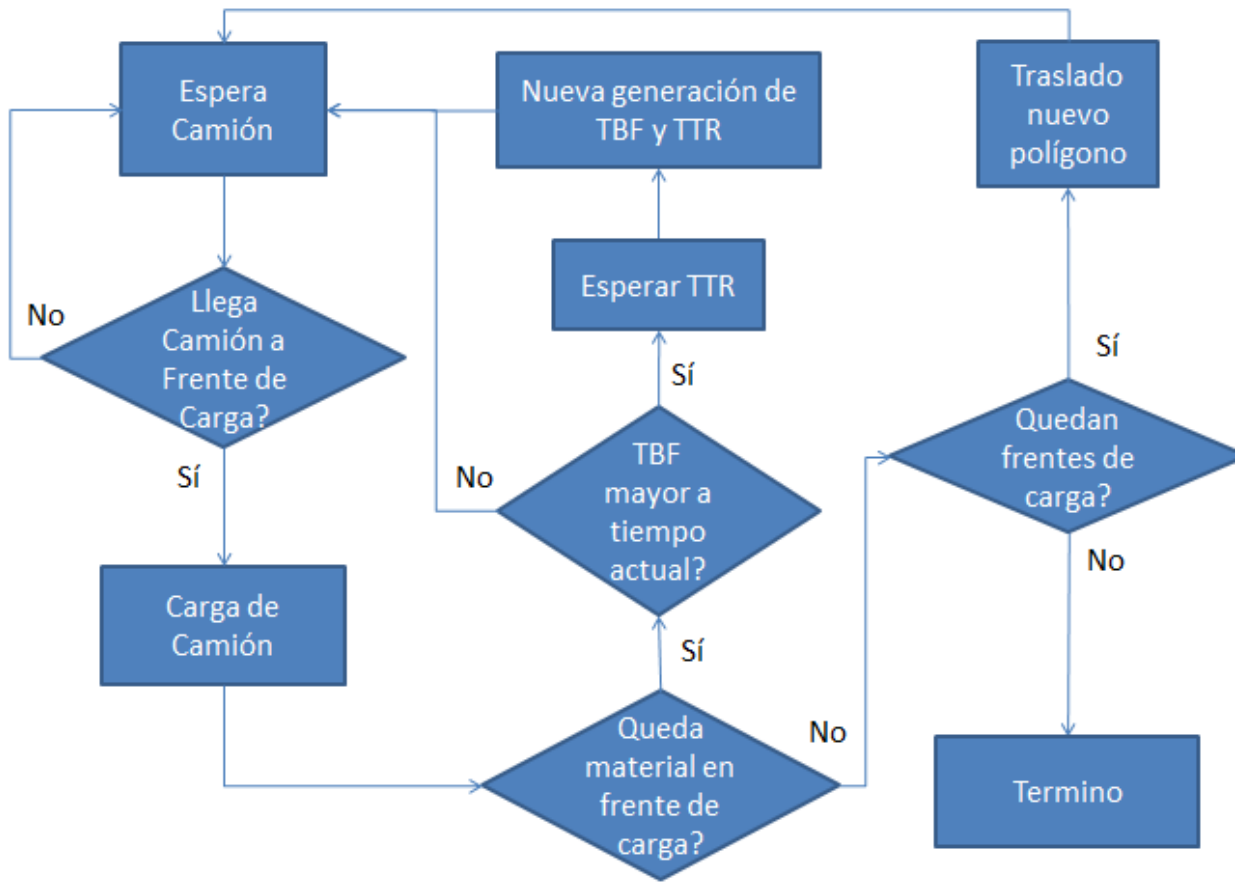


Figura 3-7: Lógica de operación general equipo de carga

3.8.4.3 Camión en frente de carga

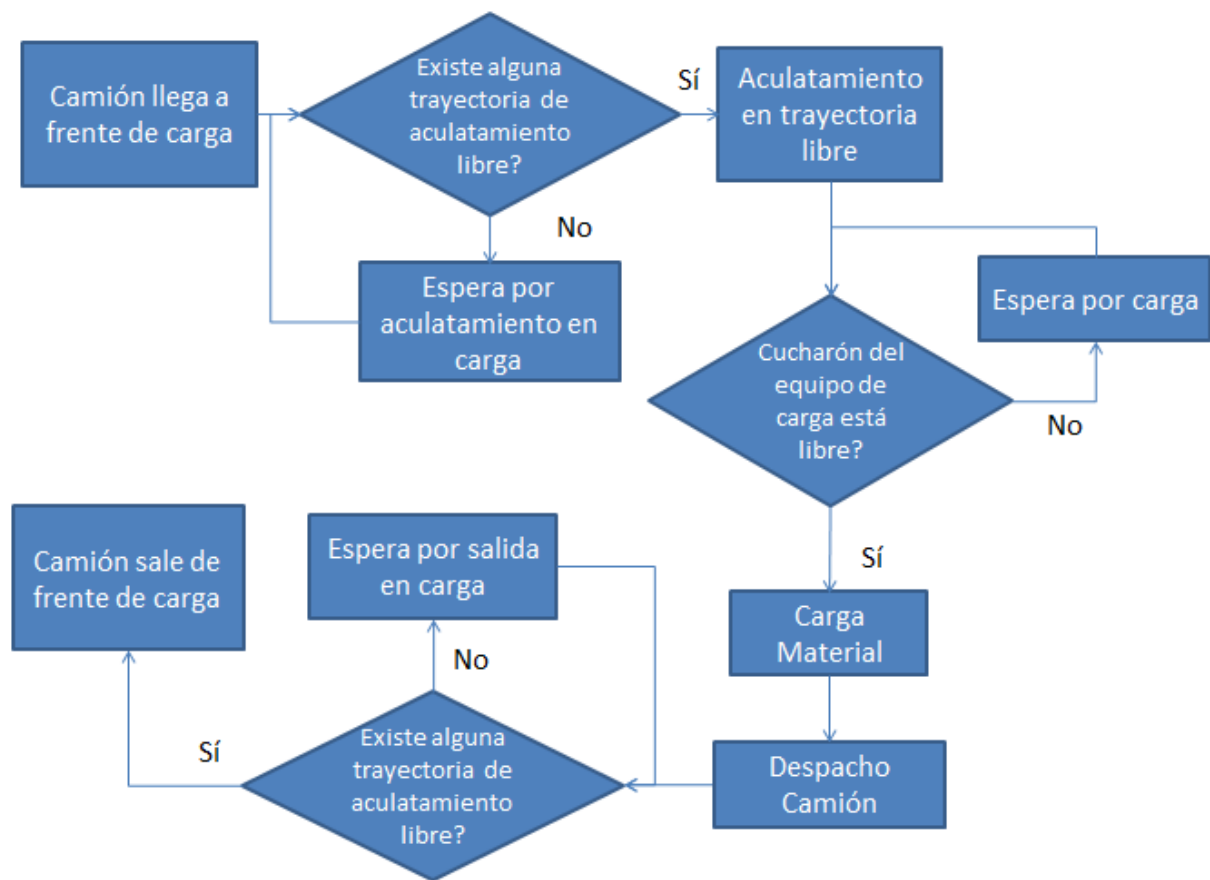


Figura 3-8: Lógica de operación camión en frente de carga

3.8.4.4 Camión en frente de descarga del tipo simple

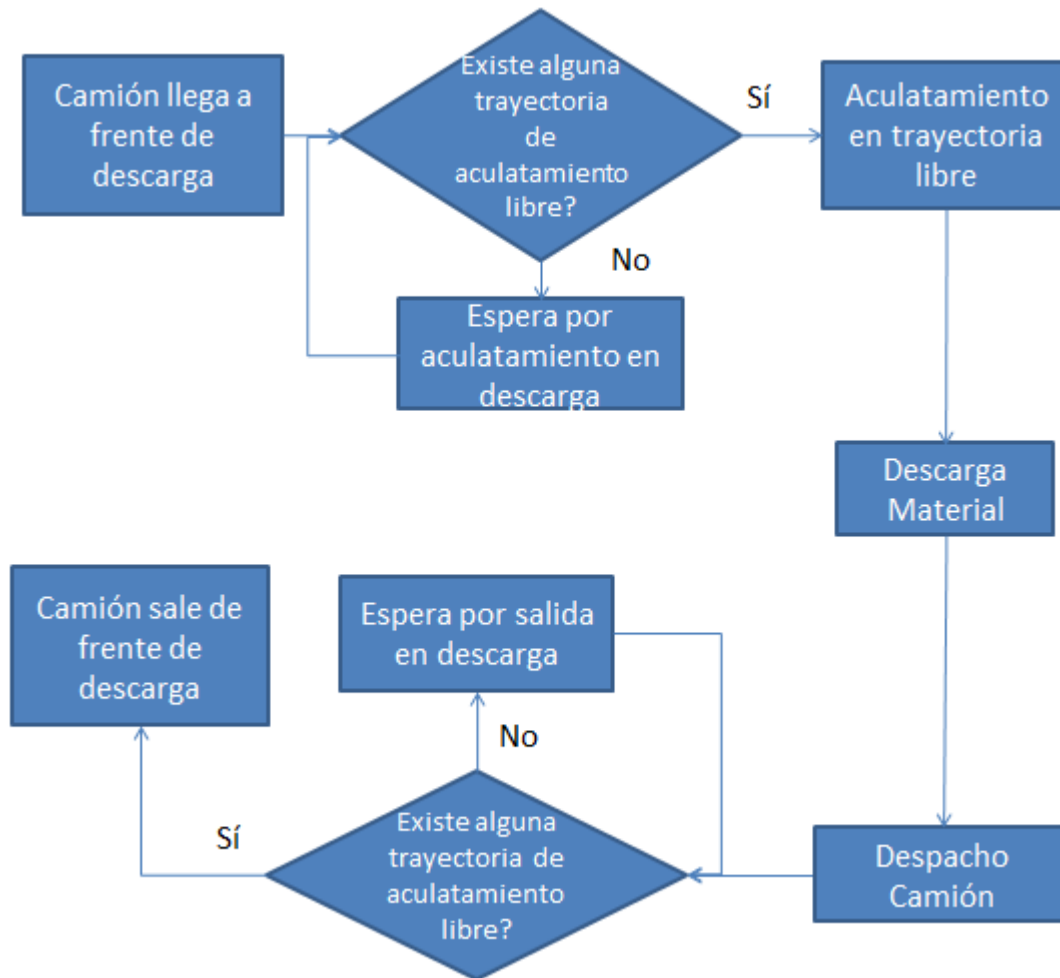


Figura 3-9: Lógica de operación camión en frente de descarga del tipo simple

3.8.4.5 Camión en frente de descarga del tipo chancador

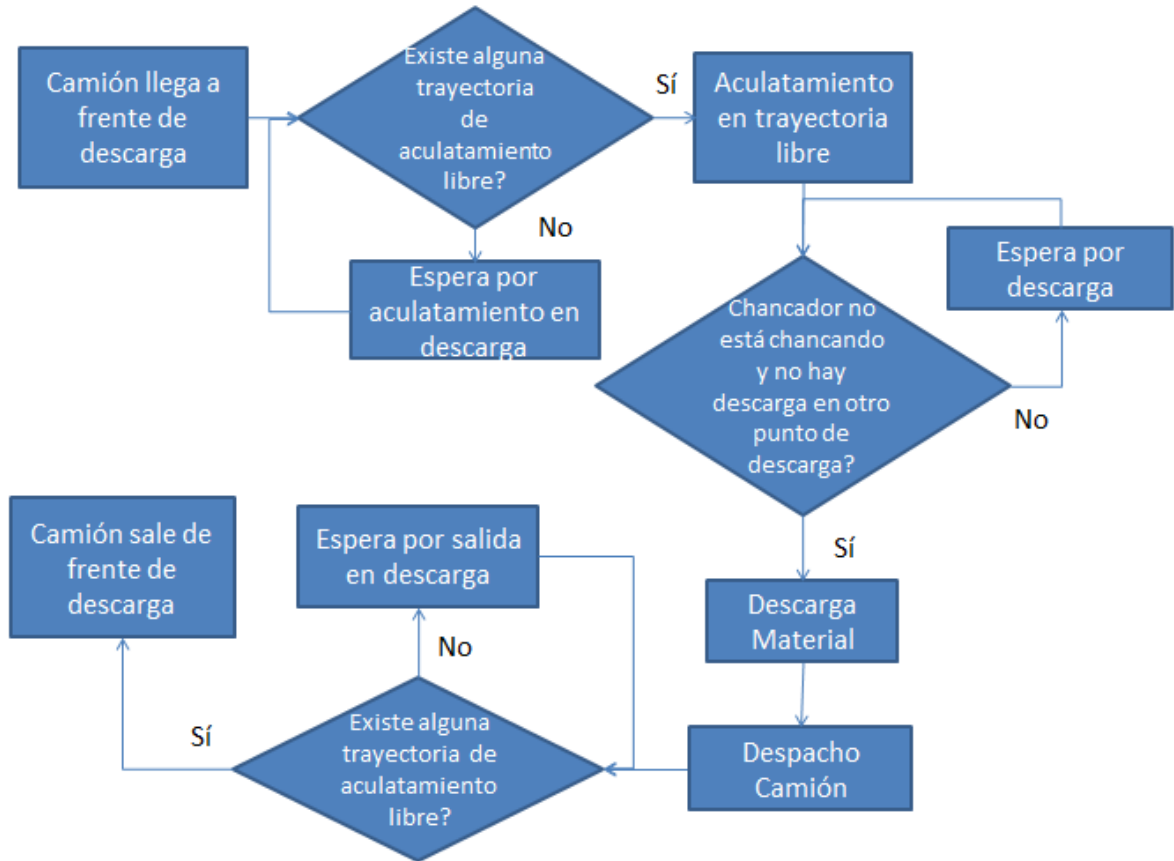


Figura 3-10: Lógica de operación camión en frente de descarga del tipo chancador

3.8.5 Algoritmos de despacho de camiones

3.8.5.1 Despacho fijo basado en estados operacionales

El primer modelo de despacho desarrollado es del tipo fijo y completamente explícito. Consiste en la especificación de la cantidad de camiones que deben ser asignados a cada circuito productivo para cada uno de los posibles estados operacionales del sistema minero. En la implementación del caso de estudio, los estados operacionales se entienden como variables que describen los estados operacionales de los componentes mineros: chancador primario, equipos de carga y camiones. Se usan variables binarias para describir los estados de los equipos de carga y el chancador primario. Si la variable toma el valor 1, el componente minero está en operación, si la variable toma el valor 0, no está en operación. Por otro lado, el número de camiones disponibles para operar es una variable de estado que toma los valores de 0 hasta el número total de camiones en operación. De este modo, la cantidad de estados operacionales del sistema es:

$$N_e = |ET| \cdot 2^{|EC|} \cdot 2^{|CH|}$$

En donde:

- N_e : Número de estados operacionales del sistema minero.
- $|ET|$: Número total de camiones en el sistema minero.
- $|EC|$: Número total de equipos de carguío en el sistema minero.
- $|CH|$: Número total de chancadores primarios en el sistema minero.

Para cada estado operacional, se especifica la cantidad de camiones asignados a cada equipo de carga. Obviamente, deben respetarse restricciones tales como:

- No se deben asignar camiones a equipos de carga que no están operativos.
- No deben asignarse equipos de transporte a equipos de carga operativos que descarguen a un chancador no operativo.
- No asignar una cantidad de camiones mayor al número de camiones disponibles para operar.

Esta manera de entender el sistema minero y de asignar componente mineros en función de los estados operacionales es precursora de los modelos de asignación de componentes mineros que se proponen más adelante.

El problema de este sistema de despacho es que debe ser completamente exhaustivo en términos de asignación de camiones para todos los estados posibles.

3.8.5.2 Despacho fijo basado en déficit de camiones

Para sobrellevar el problema del primer sistema de despacho propuesto, un segundo sistema de despacho basado en prioridades de equipos de carga en conjunto con el déficit de camiones fue desarrollado.

Al principio de la simulación, un número a priori de camiones para cada equipo de carga es asignado. A lo largo de la simulación, el despacho tenderá a alcanzar esta cantidad, que no siempre se alcanzará debido a que la cantidad de camiones varía a lo largo del tiempo.

El despacho asigna un camión disponible al equipo de carga que posea el menor porcentaje de llenado de camiones dentro de todos los equipos de carga en operación en ese instante de tiempo. El porcentaje de llenado de camiones para un equipo de carga es el número actual de camiones en operación asignados a este equipo de carga partido por el número de camiones asignados a priori al equipo de carga.

Una regla general es asignar el número máximo de camiones que soporta el circuito productivo asociado al del equipo de carga como el número de camiones asignados a priori al equipo de carga.

4 CASO DE ESTUDIO INCERTIDUMBRE OPERACIONAL

El objetivo de esta sección es describir el caso de estudio que se usa para la evaluación de la incertidumbre operacional en los resultados de un plan minero fijo. El caso de estudio corresponde a una mina de cobre a cielo abierto real, ubicada en el norte de Chile. El yacimiento es del tipo pórfido cuprífero, que se encuentra actualmente en la explotación de óxidos de cobre.

Es importante mencionar que los datos de entrada de un sistema de manejo de materiales son muy difíciles de generalizar debido a la propia naturaleza de la operación. Como señala (Çetin, 2004), todas las minas son diferentes en términos de tamaño y tipo de flota de camiones, tipos de equipos de carga, número y ubicación de botaderos, configuración de la red de transporte, etc.

4.1 Descripción general del sistema de manejo de materiales

La siguiente sección describe en forma general el sistema de manejo de materiales del caso de estudio. Se encarga de definir:

- La red de transporte de material.
- Tipos de material.
- Equipos de carga.
- Frentes de carga.
- Frentes de descarga.
- Polígonos de extracción.

4.1.1 Red de transporte de material

Se presenta en la Figura 4-1. Esta figura detalla la ubicación física de los frentes de carga y frentes de descarga de material en la red de transporte de material.

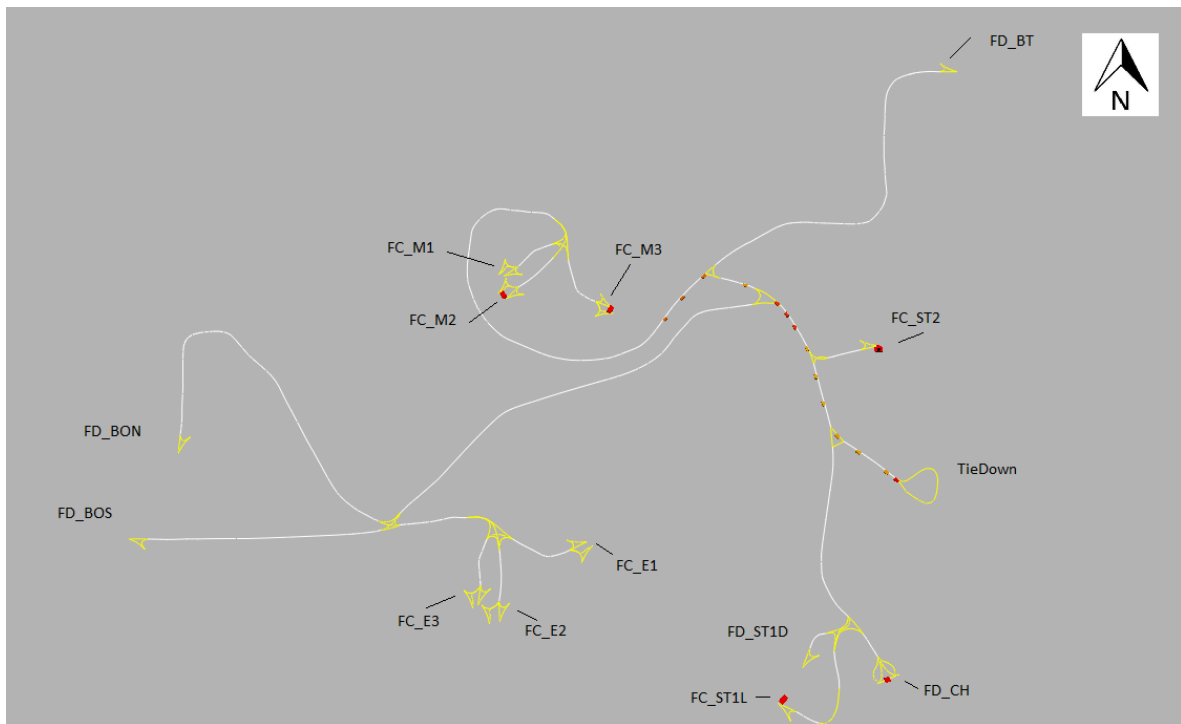


Figura 4-1: Red de transporte de material

4.1.2 Tipos de material

Los tipos de material contenidos en los polígonos de extracción son del tipo mineral y estéril. El mineral va al chancador primario o stock, mientras que el estéril va hacia los botaderos.

4.1.3 Frentes de carga

Los frentes de carga disponibles en el sistema se describen en la Tabla 4-1.

Nombre	Ubicación
FC_M1	Mina Fase 5 Banco 2535
FC_M2	Mina Fase 5 Banco 2535
FC_M3	Mina Fase 5 Banco 2535
FC_E1	Mina Fase 6 Banco 2635
FC_E2	Mina Fase 6 Banco 2635
FC_E3	Mina Fase 6 Banco 2635
FC_ST2	Stock 2 Carga Cota 2670
FC_ST1L	Stock 1 Carga Cota 2670

Tabla 4-1: Nombre y descripción de frentes de carga

4.1.4 Polígonos de extracción

Según el plan semanal real base, los polígonos de extracción de mineral son los que se muestran en la Figura 4-2.

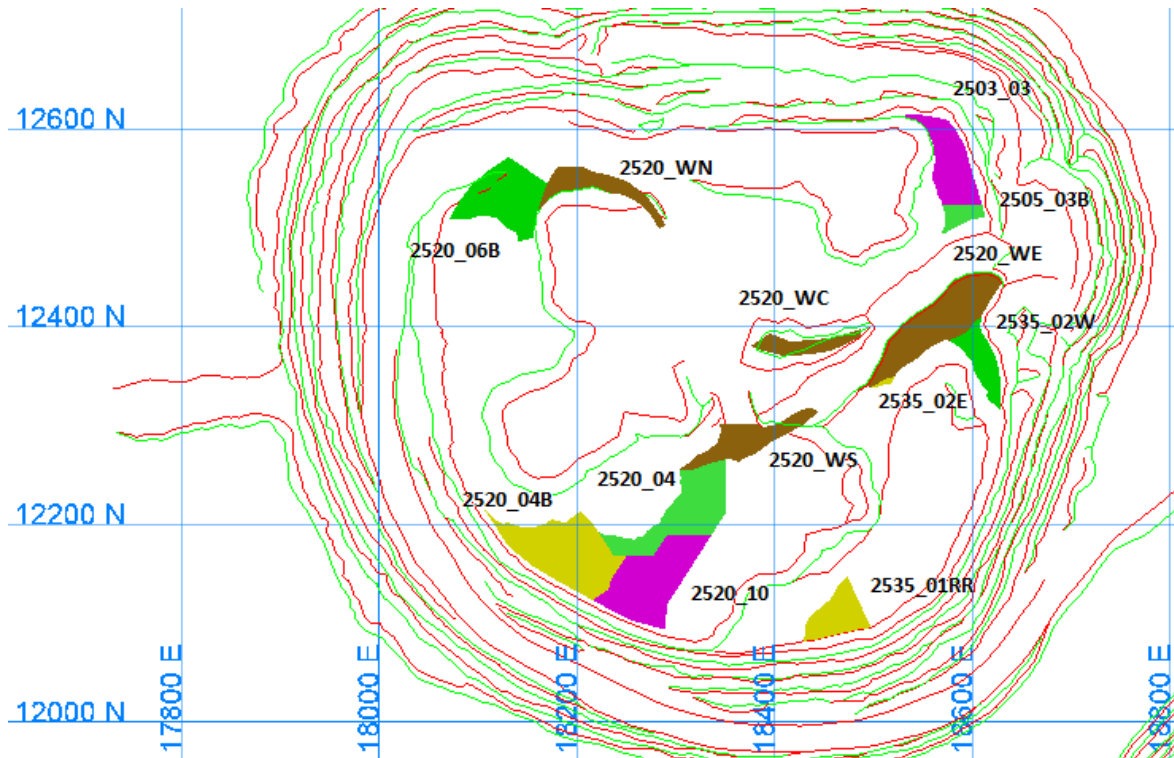


Figura 4-2: Polígonos de corto plazo. Vista en planta.

En la Tabla 4-2 se reportan las estadísticas básicas de estos polígonos.

Polígono	Área Total [m ²]	Volumen Total [m ³]	Masa Total [kg]
2505_03	764	11,455	29,268
2505_03B	3,284	49,265	125,871
2520_04	4,879	73,178	186,970
2520_04B	6,104	91,564	233,946
2520_06B	4,449	66,737	170,513
2520_10	5,501	82,510	210,814
2535_01RR	2,235	33,532	85,675
2535_02E	1,840	27,603	70,524
2535_02W	94	1,409	3,601

Tabla 4-2: Caracterización de polígonos por volumen, área y masa.

4.1.5 Frentes de descarga

Los frentes de descarga disponibles en el sistema se describen en la Tabla 4-3.

Identificador	Ubicación
FD_CH	Chancador Primario Cota 2670
FD_ST1D	Stock 1 Descarga Cota 2670
FD_BT	Botadero Intermedio Cota 2748
FD_BON	Botadero Oeste Vaciado Norte Cota 2667
FC_BOS	Botadero Oeste Vaciado Sur Cota 2667

Tabla 4-3: Identificador y descripción de frentes de descarga

4.1.6 Equipos de carga

Los equipos de carga disponibles en el sistema se describen en la Tabla 4-4.

Nombre	Descripción	Tipo Equipo de Carga
EC_PA01	Pala de Cables P&H 4100XPC no. 1	Pala de Cables
EC_PA02	Pala de Cables P&H 4100XPC no. 2	Pala de Cables
EC_PC800	Pala Hidráulica Komatsu PC8000	Pala Hidráulica
CF_01	Cargador Frontal LT-1850 no.1	Cargador Frontal
CF_02	Cargador Frontal LT-1850 no.2	Cargador Frontal

Tabla 4-4: Nombre y descripción de equipos de carga

La utilización efectiva en base nominal de los equipos de carga se encuentra en la sección 13.5.

4.1.7 Camiones

Los camiones usados en la faena minera se describen en la Tabla 4-7.

Modelo	Capacidad Nominal [t]	Cantidad
Komatsu 930E	280	18

Tabla 4-5: Nombre y descripción de equipos de carga

La utilización efectiva en base nominal de los equipos de carga se encuentra en la sección 13.4.

A partir de las estadísticas básicas de los tiempos de viaje en carga y descarga para los distintos orígenes y destinos, se deduce el siguiente modelo de velocidad de movimiento aislado, mostrado en la Tabla 4-6. El modelo de movimiento del camión en forma aislada se basa en una matriz de doble entrada, en donde las velocidad aislada del camión es función del estado de carga del camión (cargado o descargado) y de la pendiente que recorre (bajando, subiendo, y horizontal).

Las pendientes en subida y bajada deben poseer una pendiente por sobre 4% en valor absoluto para que sean consideradas en esa condición.

Estado Camión / Pendiente	Bajando	Horizontal	Subiendo
Cargado	14.2	29.2	7.7
Descargado	22.7	33.9	20.3

Tabla 4-6: Matriz de velocidades aisladas camión

Es importante mencionar que las demoras y detenciones del traslado del camión están incorporadas en la lógica del simulador, por lo que la incertidumbre referida al movimiento del camión está incorporada de forma explícita, por lo que no es necesario recurrir al ajuste de variables aleatorias como en los parámetros operacionales.

4.2 Descripción de experimentos

Los siguientes experimentos se realizan dentro del contexto del caso de estudio asociado a la incertidumbre operacional:

1. Calibración del modelo de simulación
2. Obtención de distribución de parámetros operacionales.
3. Evaluación productividad en función del número de camiones en circuitos productivos simples.
4. Evaluación productividad en función de asignaciones de camiones a circuitos productivos.
5. Evaluación productividad ante sensibilidad de medias de parámetros operacionales.
 - a. Factor de carga.
 - b. Tiempo de carga.
 - c. Velocidad Camión.
6. Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo modelos de ausencia en producción en equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales.
7. Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo sensibilidades en tiempo de producción de equipos de carga y transporte.
8. Impacto producción frente a coberturas operacionales

- a. Inhabilitación de descarga a chancado.
- b. Inhabilitación de equipos de carga.

Cada uno de estos experimentos estudia de forma específica a uno de los tipos de incertidumbre operacional identificados, los que se enumeran en la Tabla 4-7.

Experimento	Tipo de Incertidumbre Operacional
Obtención de distribución de parámetros operacionales.	Parámetros
Evaluación productividad ante sensibilidad de medias de parámetros operacionales.	Parámetros
Evaluación productividad en función del número de camiones en circuitos productivos simples.	Reasignaciones
Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo modelos de ausencia de producción en equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales	Eventos
Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo sensibilidades en tiempo de producción de equipos de carga y transporte.	Eventos
Impacto producción frente a coberturas operacionales	Reasignaciones

Tabla 4-7: Relación entre experimentos y tipo de incertidumbre operacional a estudiar

A continuación se describen cada uno de los experimentos a desarrollar, su objetivo y metodología.

4.2.1 Calibración del modelo de simulación

La verificación es realizada en términos visuales, es decir, observando que el movimiento de los componentes mineros tenga sentido.

Con respecto al proceso de calibración, la variable principal de calibración es el movimiento total a chancado. El tiempo de simulación es de 10 turnos de 12 horas. Se realizaron un total de 1000 réplicas y se toma el movimiento total promedio a chancado y se compara con el movimiento total a chancado real. Los parámetros de ajuste son los siguientes:

- Política de asignación de equipos de transporte a frentes de carga.
- Velocidad de equipos de transporte.

4.2.2 Obtención de distribución de parámetros operacionales

El experimento consiste en obtener para cada uno de los parámetros operacionales una distribución de probabilidades. Este experimento busca cuantificar la incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales.

El objetivo es cuantificar la incertidumbre operacional asociada a los parámetros operacionales por medio de distribuciones de probabilidad e integrarlos al modelo de simulación.

La metodología es la siguiente:

1. Adquisición de datos históricos de la faena en estudio.
2. Estudio exploratorio de datos.
3. Obtención de estadísticas básicas, las cuales se encuentran en la sección 13.4.
4. Ajuste de distribución para los parámetros operacionales. Para ello se usa el software StatFit (Promodel Corporation). Las distribuciones ajustadas se encuentran en la sección 13.7. El detalle de los parámetros de cada distribución se encuentra en la sección 13.8.

4.2.3 Evaluación productividad en función del número de camiones en circuitos productivos simples

Este experimento tiene por objetivo evaluar el desempeño del sistema de manejo de materiales en condiciones ideales de operación. Se entiende por condiciones ideales de operación en que, todos los componentes están en un estado de operación efectiva. Este experimento busca cuantificar un aspecto de la incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales.

Dado un circuito productivo definido por un frente de carga, un equipo de carga, y un frente de descarga, el experimento consiste en variar sucesivamente el número de camiones en el simulador para estudiar su desempeño en términos de:

- Promedio de tiempos de ciclo.
- Rendimiento equipo de transporte.
- Material descargado por circuito productivo.
- Número de camiones que saturan al circuito.

Los circuitos productivos a estudiar se muestran en la Tabla 4-8.

Nombre Circuito Productivo	Frente de Carga	Equipo de Carga	Frente de Descarga
FCM2_PC8000_CH	FCM2	PC8000	Chancador
FCM3_PA02_CH	FCM3	PA02	Chancador
ST1_CF02_CH	ST1	CF02	Chancador

Tabla 4-8: Circuitos productivos a a analizar

4.2.4 Evaluación productividad en función de asignaciones de camiones a circuitos productivos

El presente experimento consiste en evaluar distintas asignaciones de camiones a circuitos productivos de forma de evaluar cada asignación en términos de la media y varianza de la producción a chancador. Este experimento busca cuantificar un aspecto de la incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales.

Una asignación de camiones a circuitos productivos determinada se denota con tres números, en donde el orden de los números está directamente relacionado con un determinado circuito productivo, como se muestra en la siguiente la Tabla 4-9.

Número	Frente de Carga	Equipo de Carga	Frente de Descarga
Primer número	FCM2	PC8000	Chancador
Segundo número	FCM3	PA02	Chancador
Tercer número	ST2	CF02	Chancador

Tabla 4-9: Notación de estrategia de asignación de camiones a circuitos productivos

Cada uno de esos números denota el número tentativo de camiones a asignar al circuito productivo correspondiente, el cual variará a lo largo de la simulación en función de los estados operacionales de los equipos de carga y transporte.

Cada una de las estrategias de asignación es evaluada en el simulador. Las simulaciones tienen los siguientes parámetros:

- Número de periodos: 10 períodos.
- Longitud de período: 12 [h].
- Número de Réplicas: 1000.

4.2.5 Impacto en producción ante sensibilidad de medias de parámetros operacionales

Este experimento consiste en evaluar el impacto de la producción ante sensibilizaciones de las medias de algunos parámetros operacionales y su impacto en la producción total. Este experimento busca cuantificar un aspecto de la incertidumbre operacional asociada a los parámetros operacionales. Los parámetros operacionales a estudiar son los siguientes:

- Factor de Carga.
- Tiempo de Carga.
- Velocidad Aislada Camión.

Para cada parámetro operacional se definen una serie de desviaciones con respecto a la media. Para cada valor de la desviación de la media se realizan 1000 réplicas. Finalmente se promedia el movimiento total y se compara con el caso sin desviación de la media.

Los parámetros ingresados al simulador son los mismos que los ingresados en el caso base.

- Tiempo de Simulación: 10 turnos.
- Tiempo por Turno: 12 horas.

La secuencia de extracción de polígonos de carga por equipos de carga es la siguiente:

- PA02: P_2535_01RR, P_2520_06B
- PC8000: PA_2520_04, P_2520_04B, P_2520_10
- CF02: ST_1

La asignación de camiones a circuitos productivos se obtiene de acuerdo al experimento estructural. El número de camiones asignados a cada equipo de carga es la siguiente:

- PA02: 10 camiones.
- PC8000: 10 camiones.
- CF02: 2 camiones.

4.2.6 Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo modelos de ausencia de producción en equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales

Se desarrolla un estudio de evaluación del sistema de manejo de materiales bajo los siguientes términos:

- Diferentes modelos de ausencia de operación de equipos de carga.

- Diferente naturaleza de los parámetros operacionales.

Los modelos de ausencia de operación de equipos de carga fueron descritos en la sección 3.8.3.

La naturaleza de los parámetros operacionales alimentados al modelo de simulación puede ser uno de los siguientes tipos (ver Figura 4-3):

- Determinista: Los parámetros operacionales se describen como un número real fijo.
- Estocástica: Los parámetros operacionales se describen como una distribución de probabilidad.

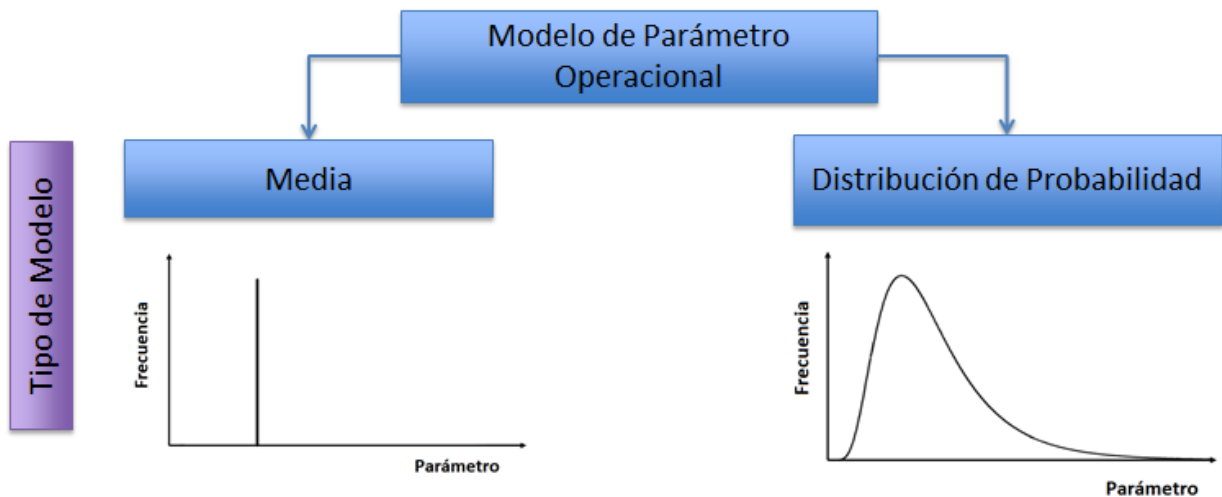


Figura 4-3: Naturaleza de modelamiento de parámetros operacionales

Con la realización de este experimento se busca responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué impacto tiene en los resultados del plan minero modelar las indisponibilidades de equipos de carga usando el modelo fijo o variable?
- ¿Qué impacto tiene en los resultados del plan minero modelar los parámetros operacionales por medias o por distribuciones de probabilidades?
- ¿Qué efecto tiene la duración de las simulaciones (1 o 10 turnos) en estos impactos?

La metodología del experimento es la siguiente: Se realizan corridas bajo todas las posibles combinaciones de los términos, generando 4 escenarios posibles, los que se listan en la Tabla 4-10.

Nombre Escenario	Naturaleza de parámetros operacionales	Modelo de ausencia de producción
Media_Fija	Media	Fija
Media_Var	Media	Variable
Distr_Fija	Distribuciones	Fija
Distr_Var	Distribuciones	Variable

Tabla 4-10: Escenarios a estudiar

Los tipos de análisis a realizar son los siguientes:

- Comparación de producción media por turno: Comparación de medias por turno entre escenarios.
- Resultados a 1 turno: Comparación de medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza entre escenarios.
- Resultados a 10 turnos: Comparación las medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza entre escenarios.

Los resultados a 1 turno son generados con los siguientes parámetros:

- Número de Períodos: 1 (1 turno).
- Duración período: 12 [h].
- Número de réplicas: 1000.

Los resultados a 10 turnos son generados con los siguientes parámetros:

- Número de Períodos: 10 (10 turnos).
- Duración período: 12 [h].
- Número de réplicas: 1000.

4.2.7 Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo sensibilidades en tiempo de producción de equipos de carga y transporte

Este experimento consiste en cuantificar la desviación estándar de la producción a diferentes niveles de tiempo en producción, tanto para equipos de carga como equipos de transporte.

El objetivo de este experimento es averiguar si la desviación estándar varía en función de los tiempos de producción de los equipos de carga y camiones. Si fuera así, cómo varía está desviación.

La metodología es la siguiente:

Para cada nivel de % de producción de equipos de carga y camiones, realizar 1000 simulaciones y cuantificar la desviación estándar de la producción. El

modelo de ausencia de producción para equipos de carga usado es del tipo variable. Finalmente, graficar de forma conveniente los resultados para realizar los análisis pertinentes.

4.2.8 Impacto producción frente a coberturas operacionales

El sistema de manejo de materiales está sujeto a eventos operacionales, los cuales cambian el estado operacional original denotado por A, hacia un estado operacional luego del evento, que denotaremos como B.

La estrategia de asignación de equipos al pasar de un estado A al estado B debe cambiar dado el cambio de estado operacional. La nueva estrategia de asignación de equipos pertenece a un conjunto de posibles estrategias de asignación de equipos.

La elección de tal o cual estrategia de asignación de equipos ante cambios de estado operacional obedece a criterios estratégicos y puede variar frente al mismo cambio de estado operacional.

Debido a las múltiples estrategias de reasignación de equipos ante cambio de estados operacionales y su consiguiente impacto en la producción total, un estudio del impacto de la producción frente a coberturas operacionales es realizado.

Los escenarios que se enumeran a continuación son eventos operacionales con que operaciones mina suele enfrentarse y son los que se tomarán en cuenta en este estudio.

- Inhabilitación de descarga en chancado.
- Inhabilitación de un equipo de carga.

En concreto, la metodología a seguir en este estudio es la siguiente:

- Identificación del escenario operacional.
- Identificación de las posibles opciones a seguir en respuesta al nuevo escenario operacional.
- Evaluación de implementación de cada una de las opciones usando el simulador.
- Análisis y comparación entre opciones.

La relevancia de la metodología propuesta es que se cuenta con la evaluación en la producción de cada uno de las posibles acciones a tomar, por lo que los tomadores de decisiones pueden realizar decisiones con mayor información, a diferencia de lo que ocurriría en el caso en donde no se realiza la evaluación de las opciones, en donde las decisiones son tomadas en base a la mera intuición que, a veces, puede no ser la respuesta deseada.

Es importante mencionar que como consideración práctica, para cada escenario operacional, la decisión a tomar debe ser evaluada antes que ocurra, de manera que operaciones mina tenga estrategias de respuesta a escenarios "no previstos" conocidos de antemano.

4.2.8.1 Inhabilitación de descarga a chancado

La inhabilitación de descarga a chancado es parte de un estado operacional en que el chancador no puede recibir ninguna descarga de material de parte de los camiones mineros. Este estado puede deberse a los siguientes eventos operacionales:

- Mantención o falla de equipo de chancado.
- Mantención o falla de equipos o instalaciones aguas abajo del equipo de chancado.
- Saturación de material de stock pile de mineral.

Al enfrentar el sistema de manejo de material un cambio de estado operacional desde chancado habilitado para descarga hacia chancado inhabilitado para descarga, existen diferentes formas de reasignación de componentes mineros del sistema.

Para ilustrar de mejor manera este escenario operacional se estudia el siguiente caso.

4.2.8.1.1 Descripción del estado operacional basal

Posturas de equipos de carga:

- PA02 en frente de carga FC_M3 (polígono P_F5_2520_06B), extracción de frente de mineral con destino chancado primario. Asignación de 6 camiones mineros.
- PC8000 en frente de carga FC_M2 (polígono P_F5_2520_04), extracción de frente de mineral con destino chancador primario. Asignación de 6 camiones mineros.

4.2.8.1.2 Descripción del evento operacional

Inhabilitación de descarga a chancado en un tiempo inicial dado, cuya duración es otro intervalo de tiempo. Luego de esto el chancado vuelve a estar habilitado para descargar.

4.2.8.1.3 Descripción de reasignaciones operacionales a evaluar

Se estudiarán tres diferentes opciones de reasignación de equipos, las cuales se denotan como sigue:

- Opción Botadero.
- Opción Stock.
- Opción Botadero Stock.

Las opciones de reasignación de equipos se describen a continuación.

4.2.8.1.4 Opción Botadero

La opción botadero consiste resumidamente en un cambio de postura de equipos de carga PA02 y PC8000 a frentes de carga de estéril ante la inhabilitación del chancado.

En detalle:

- 1) Al ocurrir la inhabilitación de descarga a chancado, los camiones cargados con mineral por PC8000 y PA02 reaccionan en tiempo de viaje a la inhabilitación de descarga del chancado y reasignan su destino hacia el stock ST1D, stock cercano al chancador primario.
- 2) Al ocurrir la inhabilitación de descarga a chancado, se realiza un cambio de postura de PC8000 desde el frente actual de mineral hacia un frente de estéril también ubicado en fase 5 banco 2520. El tiempo de cambio de postura es de 20 min.
- 3) Mientras PC8000 realiza el cambio de postura, PA02 ahora es alimentado por 12 camiones mineros (los 6 camiones propios más los 6 que tenía PC8000). Los camiones cargados por la PC8000 descargan en el stock ST1D, dada la inhabilitación de descarga en chancado.
- 4) Una vez habilitado para cargar el equipo PC8000 se inicia el cambio de postura de la PA02 hacia otro frente de estéril ubicado en fase 5 banco 2520. El tiempo de cambio de postura desde la frente actual es de 20 min.
- 5) Mientras PA02 realiza el cambio de postura, PC8000 ahora es alimentado por 12 camiones mineros. Los camiones cargados por la PC8000 descargan en el botadero oeste.
- 6) Una vez habilitado para cargar el equipo PA02, tanto este equipo como la PC8000 ahora son alimentados por 6 camiones cada uno, los cuales descargan al botadero oeste.
- 7) Al ocurrir la habilitación de descarga a chancado, la PC8000 realiza un cambio de postura a su frente de mineral inicial. El tiempo de cambio de postura es de 20 min. La PA02 mientras tanto, es alimentada por 12 camiones mineros que descargan al botadero oeste.
- 8) Una vez habilitada la PC8000 para cargar, es alimentada por los 12 camiones mineros que depositan en chancado, mientras que la PA02 realiza un cambio de postura hacia la frente de mineral original. El tiempo de cambio de postura es de 20 min.
- 9) Finalmente, una vez habilitado la PA02 para cargar, es alimentada por 6 camiones mineros que depositan en chancado. La PC8000 es alimentada por 6 camiones mineros que depositan a chancado.

4.2.8.1.5 Opción Stock

La opción Stock se resume como una simple reasignación de destino desde chancador a Stock 1.

En detalle:

- 1) Al ocurrir la inhabilitación de descarga a chancado, los camiones cargados con mineral por PC8000 y PA02 reaccionan en tiempo de viaje a la inhabilitación de descarga del chancado y reasignan su destino hacia el stock ST1D, stock cercano al chancador primario.
- 2) Al rehabilitarse el chancador primario, los camiones cargados reaccionan en tiempo de viaje y descargan en el chancador.

4.2.8.1.6 Opción Stock Botadero

La opción stock botadero consiste en una reasignación de PC8000 a frente de carga estéril y reasignación de destino de Stock 1 desde PA02.

En detalle:

- 1) Al ocurrir la inhabilitación de descarga a chancado, los camiones cargados con mineral por PC8000 y PA02 reaccionan en tiempo de viaje a la inhabilitación de descarga del chancado y reasignan su destino hacia el stock ST1D, stock cercano al chancador primario.
- 2) Al ocurrir la inhabilitación de descarga a chancado, se realiza un cambio de postura de PC8000 desde el frente actual de mineral hacia el frente de estéril también ubicado en fase 5 banco 2520. El tiempo de cambio de postura es de 20 min.
- 3) Mientras PC8000 realiza el cambio de postura, PA02 ahora es alimentado por 12 camiones mineros (los 6 camiones propios más los 6 que tenía PC8000). Los camiones cargados por la PC8000 descargan en el stock ST1D, dada la inhabilitación de descarga en chancado.
- 4) Una vez habilitada la PC8000 para cargar, es alimentada por los 6 camiones mineros que depositan en el botadero oeste, mientras que la PA02 es alimentada por los 6 camiones mineros que depositan en el ST1D.
- 5) Una vez habilitado la PA02 para cargar, es alimentada por 6 camiones mineros que depositan en chancador. La PC8000 es alimentada por 6 camiones mineros que depositan a chancador.
- 6) Al ocurrir la habilitación de descarga a chancado, la PC8000 realiza un cambio de postura a su frente de mineral inicial. El tiempo de cambio de postura es de 20 min. La PA02 mientras tanto, es alimentada por 12 camiones mineros que descargan en ST1D.

Las opciones de operación explicadas se presentan esquemáticamente en la Figura 4-4.

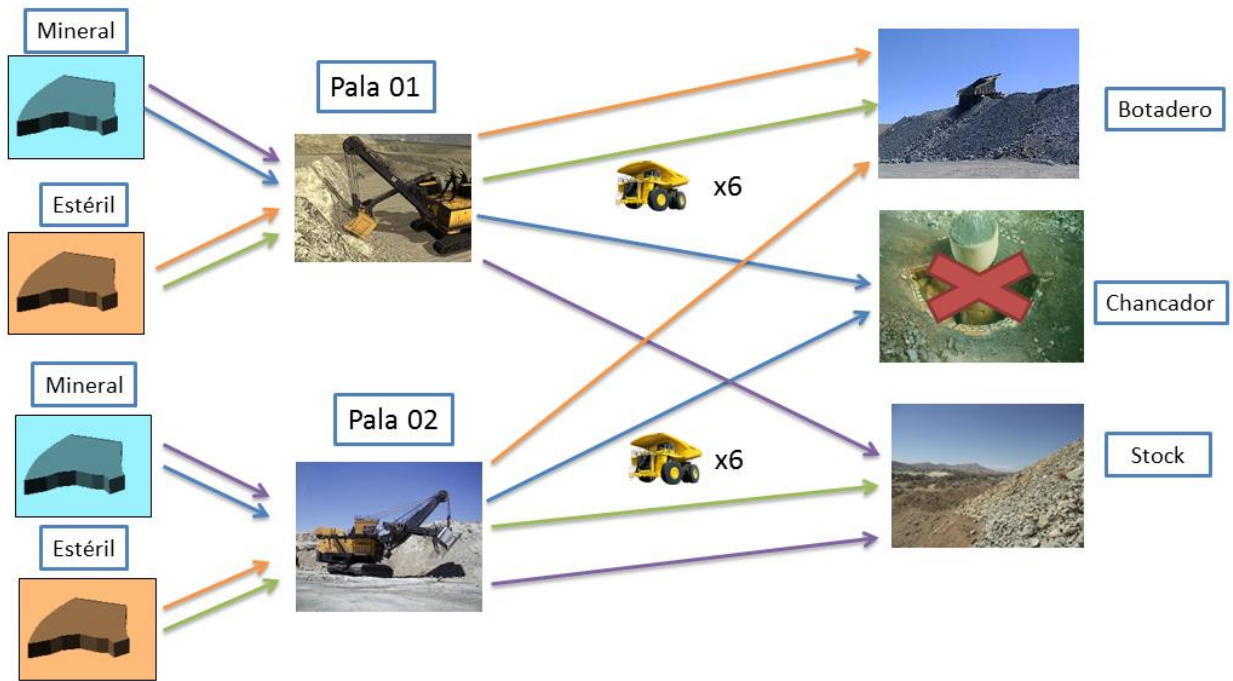


Figura 4-4: Resumen opciones operación ante inhabilitación de descarga a chancado

La simbología de la figura Figura 4-4 se define en la Figura 4-5.



Figura 4-5: Simbología opciones de operación ante inhabilitación de descarga a chancado

4.2.8.2 Inhabilitación de equipos de carga

4.2.8.2.1.1 Descripción del estado operacional basal

Posturas de equipos de carga:

- PA02 en frente de carga FC_M3 (polígono P_F5_2520_06B), extracción de frente de mineral con destino chancado primario. Asignación de 5 camiones mineros.
- PC8000 en frente de carga FC_M3 (polígono P_F5_2520_04), extracción de frente de mineral con destino chancador primario. Asignación de 5 camiones mineros.
- CF02 en Stock01, extracción de material con destino chancador primario. Asignación de 2 camiones mineros.

4.2.8.2.1.2 Descripción del evento operacional

4.2.8.2.1.3 Inhabilitación PC8000

Inhabilitación del equipo de carga PC8000 en un tiempo inicial de 1 hora, cuya duración es variable (entre 1 a 10 horas). Luego de esto el equipo de carga vuelve a estar habilitado para cargar.

4.2.8.2.1.4 Inhabilitación PA02

Inhabilitación del equipo de carga PA02 en un tiempo inicial de 1 hora, cuya duración es variable (entre 1 a 10 horas). Luego de esto el equipo de carga vuelve a estar habilitado para cargar.

4.2.8.2.1.5 Inhabilitación CF02

Inhabilitación del equipo de carga CF02 en un tiempo inicial de 1 hora, cuya duración es variable (entre 1 a 10 horas). Luego de esto el equipo de carga vuelve a estar habilitado para cargar.

4.2.8.2.1.6 Descripción de reasignaciones operacionales a evaluar

4.2.8.2.1.7 Opción camiones: Cambio en el número de asignación de camiones en equipos de carga

Movimiento de equipo de carga hacia zona cercana a la frente de carga que se ve afectada por la falla del equipo de carga.

Cambio en el número de camiones a nuevos ciclos configurados.

Número de descargas por frente de descarga, frentes de carga y equipo de carga.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS INCERTIDUMBRE OPERACIONAL

5.1 Verificación y validación del modelo de simulación

El primer resultado del caso de estudio corresponde a la verificación y calibración del modelo de simulación realizado. Los resultados se muestran en el Gráfico 5-1 y la Tabla 5-1.

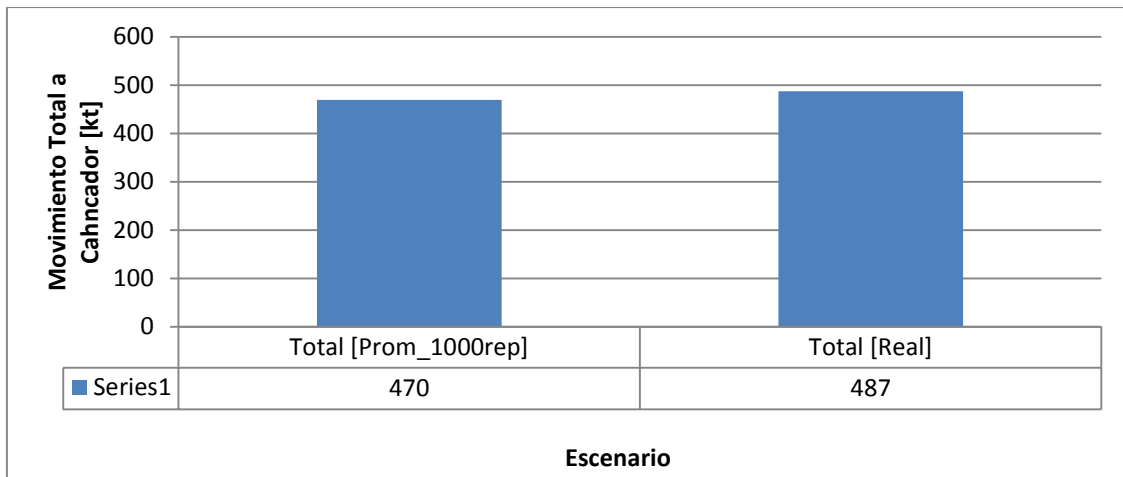


Gráfico 5-1: Comparación Movimiento Total Caso Real vs Promedio 1000 simulaciones

Item	10 Turnos	Promedio Turno
Total Chancado [kt]{Prom_1000rep}	469.6	47.0
Total Chancador [kt] {Real}	487.1	48.7
Diferencia Absoluta [kt]	17.5	1.8
Diferencia Relativa [%]	-3.59	-3.59

Tabla 5-1: Diferencia Caso Real vs Promedio 1000 réplicas

Otras calibraciones realizadas para un soporte temporal de un turno fueron realizadas. Como ejemplo se reporta la comparación entre los resultados reales y simulados de un turno en particular en la sección 13.9.

Los resultados se muestran en el Gráfico 5-1 y la Tabla 5-1. La validación obtuvo un error porcentual menor al 4% con respecto al movimiento total real. Este resultado es satisfactorio considerando que en la realidad el despacho de camiones tiene un componente humano complejo de difícil integración al modelo y además se toma en cuenta que en la operación minera real no existen protocolos de reasignación de componentes mineros definidos.

5.2 Obtención de distribuciones de parámetros operacionales

A continuación se muestran las distribuciones de probabilidades para los parámetros operacionales considerados. Los histogramas experimentales y las curvas de distribución de probabilidad se encuentran en la sección 13.7.

5.2.1 Factor de carga

Tipo de Equipo de Carga	Tipo Frente de Carga	Nombre Distribución	Parametro1	Parametro2	Parametro3	Parametro4
Pala de Cables	Mina	Weibull	-84.5	14.3	364	-
Pala Hidráulica	Mina	Beta	171	320	4.43	1.86
Cargador Frontal	Mina	Weibull	116	6.72	173	-
Cargador Frontal	Stock	Weibull	-54.5	14.2	328	-

Tabla 5-2: Distribuciones de Probabilidad. Factor de carga

Todas las distribuciones ajustadas son del tipo Weibull, salvo PC_MINA, que obtuvo una distribución del tipo Beta.

En cuanto a las medias, las configuraciones PC_MINA y CF_MINA obtienen las mayores medias (alrededor de 277 [t]), mientras que las configuraciones PA_MINA obtienen medias menores, PA_MINA 266 [t] y CF_STOCK 262 [t].

Las discrepancias entre las medias se deben a las condiciones de frente de carga, la capacidad del cucharón y la forma de carga de cada equipo de carga. En cuanto a la desviación estándar, todas las configuraciones se mueven en valores similares, de alrededor de 28 [t], salvo la configuración PC_MINA, que obtiene valores del orden de 25 [t].

Todas las distribuciones obtienen colas derechas más delgadas que las colas izquierdas.

Las colas más delgadas se deben a la limitación física de la capacidad del chancador. Por otro lado, las ineficiencias en el carguío tales como baldadas no colmadas de material o material muy esponjado explican las colas más gruesas.

5.2.2 Tiempo de carga

Tipo de Equipo de Carga	Tipo Frente de Carga	Nombre Distribución	Parametro1	Parametro2	Parametro3	Parametro4
Pala de Cables	Mina	Johnson SB	0.816	25.8	6.39	1.9
Pala Hidráulica	Mina	LogLogistic	1.06	4.41	1.08	-
Cargador Frontal	Mina	Johnson SB	3.9	5.78	9.31E-02	1.2
Cargador Frontal	Stock	Johnson SB	2.82	12.1	2.19	2.17

Tabla 5-3: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de carga

Todas las distribuciones ajustadas son del tipo Johnson SB, salvo PC_MINA, que obtuvo una distribución del tipo LogLogistic.

Las medias de carga tienen que ver con las condiciones del frente de carga pero más que nada con el modelo de equipo de carga. Los menores tiempos de carga son PA_MINA con 1.8 [min] y PC_MINA con 2.2 [min], mientras que los mayores tiempos de carga son los asociados al cargador frontal, como era esperado. CF_MINA obtiene 6.7 [min], mientras CF_STOCK obtiene 6.2 [min]. El tiempo de carga del cargador frontal en mina es mayor al tiempo de carga en stock puesto que las condiciones de carga en stock son más favorables para el cargador frontal (pila de altura más baja en el stock que en mina).

En cuanto a la desviación estándar, las menores desviaciones las obtienen las configuraciones PA_MINA y PC_MINA con 0.47, mientras que las mayores desviaciones son obtenidas por las configuraciones CF_MINA y CF_STOCK con 1.05 y 1.07 respectivamente. Esto se debe a que las realizaciones de cada baldada son más acotadas en los casos de los equipos de carga PA y PC, puesto que físicamente solo involucran un giro del brazo que contiene el cucharón, mientras que el cargador frontal requieren maniobras más complejas para realizar cada una de las baldadas.

Todas las distribuciones obtienen colas derechas más gruesas que las colas izquierdas.

Las colas más delgadas se explican debido a que las realizaciones de carga menores se encuentran con un límite físico que es el tiempo de carga más eficientemente posible. Por otro lado, las realizaciones de carga mayores no tienen un límite acotado (a diferencia de las realizaciones menores), por lo que las pequeñas demoras en la carga de cada una de las baldadas resultan en realizaciones mayores y por lo tanto, colas derechas más gruesas.

5.2.3 Tiempo de aculatamiento en carga

Tipo de Equipo de Carga	Tipo Frente de Carga	Nombre Distribución	Parametro1	Parametro2	Parametro3	Parametro4
Pala de Cables	Mina	Inverse Weibull	-2.45	10.6	0.262	-
Pala Hidráulica	Mina	Inverse Weibull	-2.91	13.4	0.235	-
Cargador Frontal	Mina	LogLogistic	0.365	4.64	1.12	-
Cargador Frontal	Stock	Pearson6	0.492	0.464	17.6	10.9

Tabla 5-4: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de aculatamiento en carga

Todas las distribuciones ajustadas son del tipo InverseWeibull, salvo CF_MINA, que obtuvo una distribución del tipo LogLogistic y CF_STOCK, que obtuvo una distribución del tipo Pearson6.

Las medias de cada configuración son relativamente similares. La configuración PA_MINA con 1.62 [min] y PC_MINA con 1.56 [min], CF_MINA obtiene 1.57 [min], mientras CF_STOCK obtiene 1.32 [min]. Las medias son similares entre configuraciones puesto que el tiempo de aculatamiento depende mayormente del área del frente de carga y no del tipo de equipo de carga.

El tiempo de aculatamiento en mina es mayor al de aculatamiento en stock ya que el área de aculatamiento es mayor en mina que en el stock, por lo que el camión debe recorrer mayor distancia para aculatarse en mina que en stock.

Las desviaciones estándar de las configuraciones son relativamente similares, obteniendo 0.52, 0.46, 0.47 y 0.34 [min] para PA_MINA, PC_MINA, CF_MINA y CF_STOCK, respectivamente.

Todas las distribuciones obtienen colas derechas más gruesas que las colas izquierdas.

Las colas más delgadas se explican debido a que las realizaciones de aculatamiento en carga menores se encuentran con un límite físico que es el tiempo aculatamiento en carga más eficientemente posible. Por otro lado, las realizaciones de aculatamiento en carga mayores no tienen un límite acotado (a diferencia de las realizaciones menores), por lo que las variaciones de trayectoria de aculatamiento al evolucionar la forma del frente de carga resultan en realizaciones mayores y por lo tanto, colas derechas más gruesas.

5.2.4 Tiempo de descarga

Tipo Frente de Descarga	Nombre Distribución	Parametro1	Parametro2	Parametro3	Parametro4
Botadero Intermedio	LogLogistic	1.22	4.21	0.11	-
Botadero Oeste	LogLogistic	1.3	3.24	0.108	-
Stock Genérico	LogLogistic	0.574	11.2	0.678	-

Tabla 5-5: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de descarga

Todas las distribuciones ajustadas son del tipo LogLogistic.

Las medias de cada configuración son relativamente similares para las configuraciones Botadero Intermedio y Botadero Oeste, con medias de 1.34 y 1.43 [min], respectivamente. Las medias para las configuraciones asociados a los Stocks y Chancador son menores y son 1.27 y 0.81 [min] respectivamente. Las medias en STOCK y CH son menores que las configuraciones asociadas a botaderos puesto que el área de descarga tiene tendencia a cambiar su forma. En cuanto a las desviaciones estándar, éstas son relativamente similares, del orden de 0.12 [min].

Todas las distribuciones obtienen colas derechas más delgadas que las colas izquierdas.

Las colas más delgadas se explican debido a que las realizaciones de descarga menores se encuentran con un límite físico que es el tiempo de descarga más corto posible. Por otro lado, las realizaciones de descarga mayores no tienen un límite acotado (a diferencia de las realizaciones menores), por lo que las pequeñas variaciones de descarga resultan en realizaciones mayores y por lo tanto, colas derechas más gruesas.

5.2.5 Tiempo de acuatamiento en descarga

Tipo Frente de Descarga	Nombre Distribución	Parametro1	Parametro2	Parametro3	Parametro4
Botadero Intermedio	Gamma	1.16	3.62	0.146	-
Botadero Oeste	Erlang	1.55	6	1.00E-02	-
Stock Genérico	Inverse Weibull	-1.2	11.9	0.443	-

Tabla 5-6: Distribuciones de Probabilidad. Tiempo de acuatamiento en descarga

No existe una predominancia al tipo de distribución, obteniéndose distribuciones del tipo Gamma, Erlang e InverseWeibull.

Las medias de cada configuración son relativamente similares para las configuraciones STOCK y CH, con 1.18 y 1.19 [min], respectivamente. Las medias para las configuraciones asociados a los botaderos Intermedio y Oeste son mayores y son 1.69 y 2.09 [min] respectivamente. Las medias en STOCK y CH son menores que las configuraciones asociadas a botaderos puesto que el área de descarga tiene tendencia a cambiar su forma. Los frentes de descarga obtienen medias diferentes puesto que el área de descarga en el Botadero Oeste es mayor que en el Botadero Intermedio.

En cuanto a las desviaciones estándar, éstas son relativamente similares, del orden de 0.25 [min].

Todas las distribuciones obtienen colas derechas más gruesas que las colas izquierdas.

Las colas más delgadas se explican debido a que las realizaciones de aculatamiento en descarga menores se encuentran con un límite físico que es el tiempo de aculatamiento en descarga más corto posible. Por otro lado, las realizaciones de aculatamiento en descarga mayores no tienen un límite acotado (a diferencia de las realizaciones menores), por lo que las variaciones de trayectoria de aculatamiento al evolucionar la forma del frente de descarga resultan en realizaciones mayores y por lo tanto, colas derechas más gruesas.

5.3 Evaluación productividad en función del número de camiones en circuitos productivos simples

5.3.1 Ciclo productivo: FCM3_PC800_CH

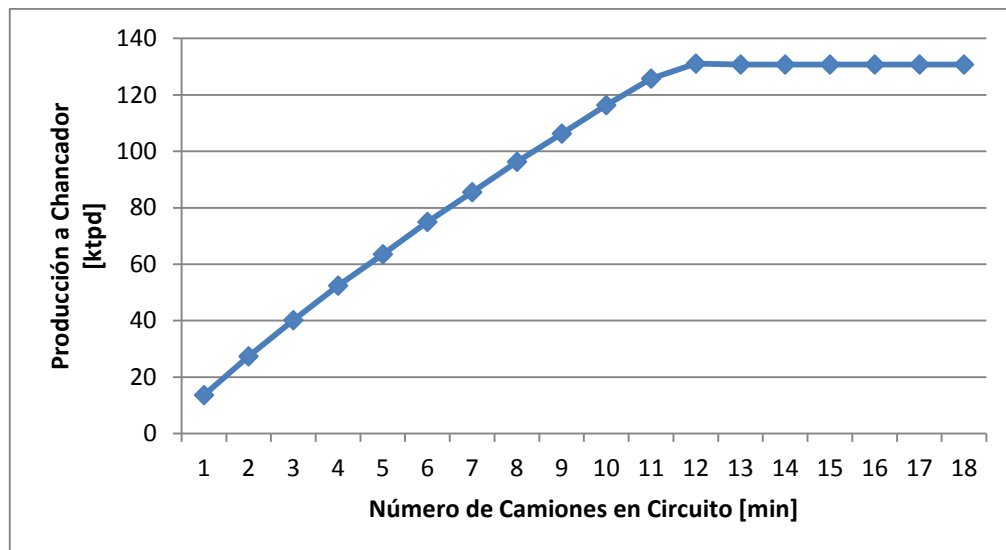


Gráfico 5-2: Producción vs Número de Camiones en circuito FCM3_PC8000_CH

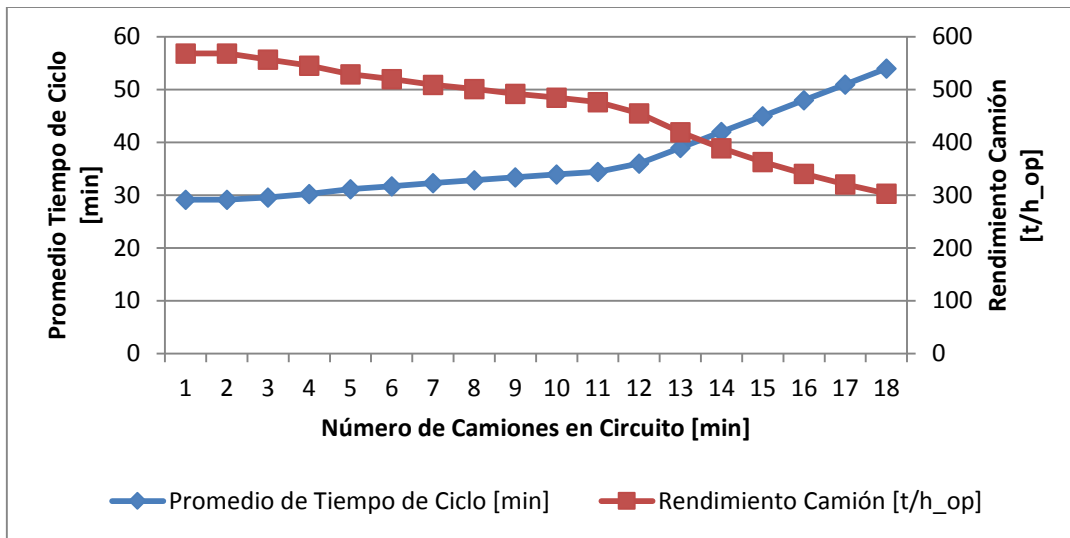


Gráfico 5-3: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito FCM3_PC8000_CH

5.3.2 Ciclo productivo: FCM2_PA02_CH

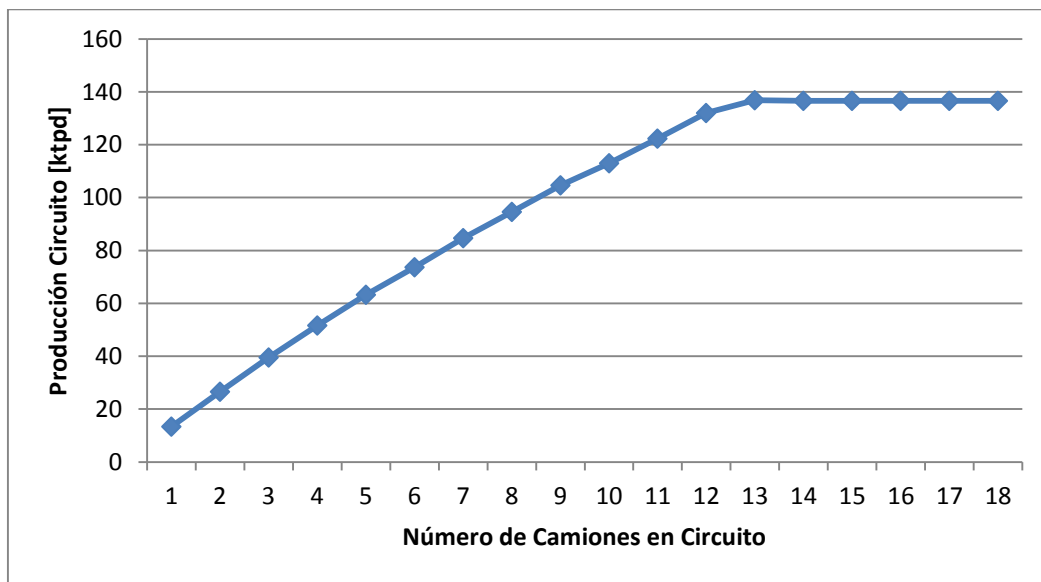


Gráfico 5-4: Producción vs Número de Camiones en circuito FCM2_PA02_CH

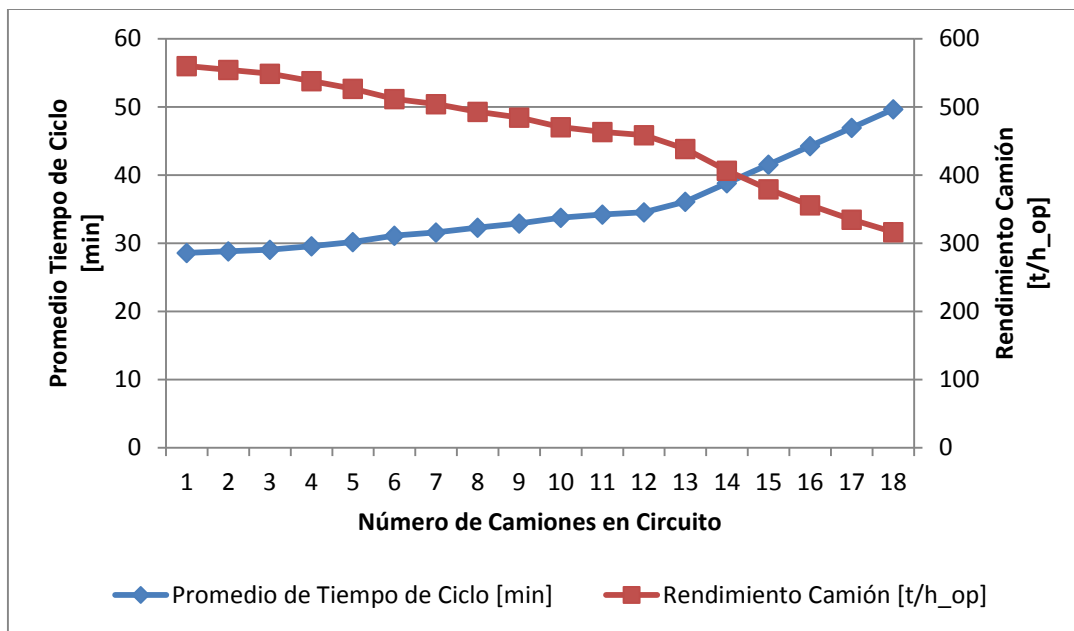


Gráfico 5-5: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito FCM2_PA02_CH

5.3.3 Ciclo productivo: ST1_CF02_CH

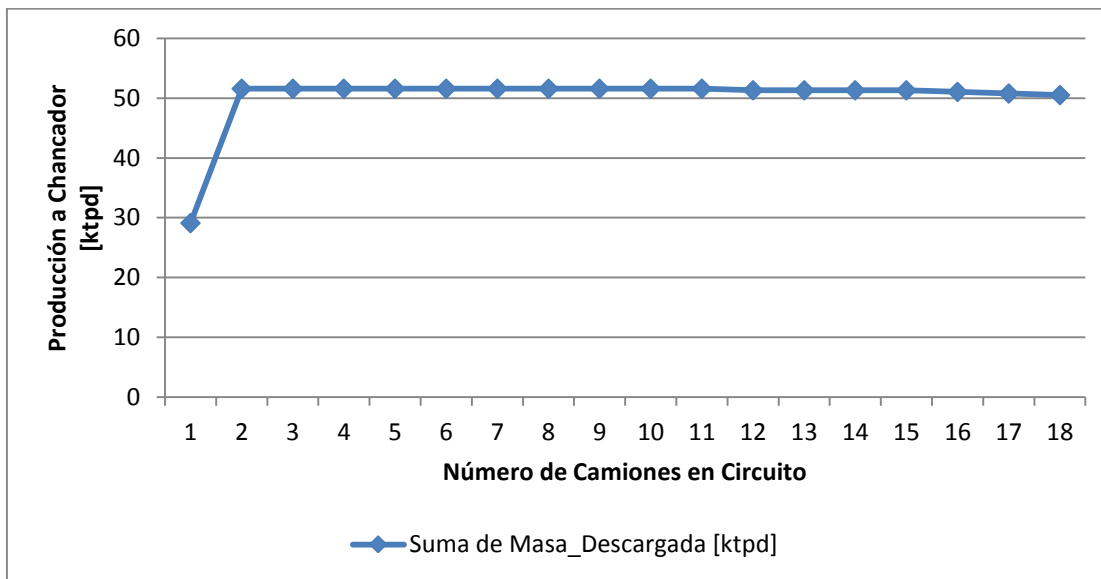


Gráfico 5-6: Producción vs Número de Camiones en circuito. ST1_CF02_CH

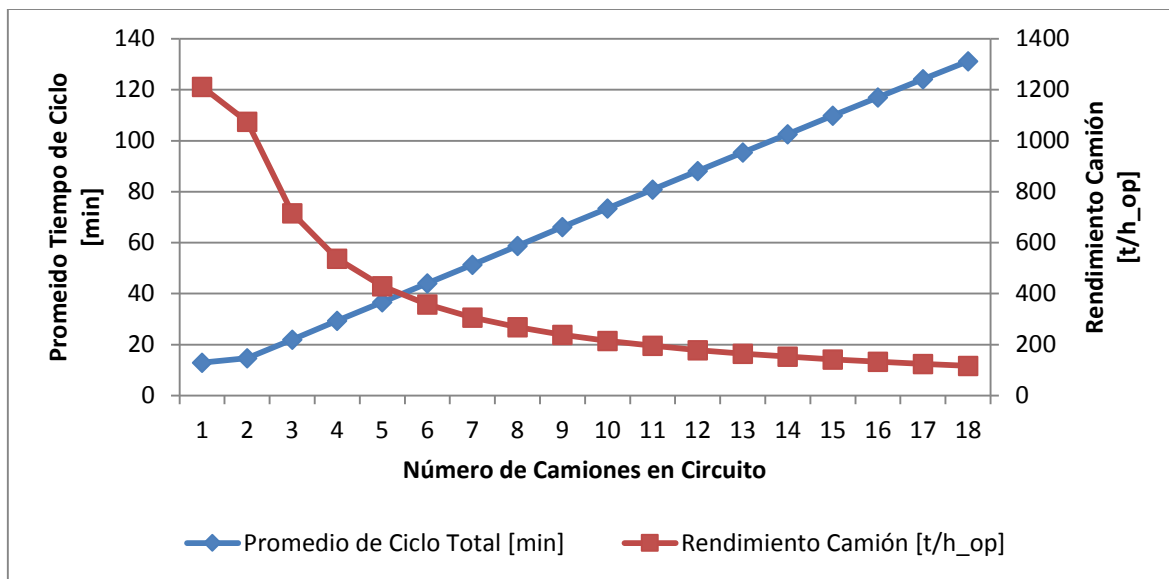


Gráfico 5-7: Tiempo de Ciclo Medio vs Número de Camiones en circuito ST1_CF02_CH

La productividad del circuito productivo aumenta conforme aumenta el número de camiones hasta un punto en donde la capacidad del circuito llega a un máximo de capacidad. Al seguir aumentando el número de camiones el circuito productivo no alcanzará una productividad mayor debido a la saturación de alguno de los frentes (equipo de carga o chancador, si corresponde).

La capacidad máxima de un circuito productivo está dada por el servidor más lento ubicado en alguno de los frentes de servicio debido a la limitación física que tiene para cargar o descargar material.

El tiempo de ciclo promedio de los camiones aumenta por efecto de las esperas por carga y descarga en los frentes respectivos y las interferencias en ruta entre camiones.

El rendimiento unitario del camión (en toneladas por hora camión) es decreciente al aumentar el número de camiones en el circuito debido a que los tiempos de ciclo son decrecientes conforme aumenta el número de camiones en el circuito y mantenerse el factor de carga constante.

5.4 Evaluación productividad en función de asignaciones de camiones a circuitos productivos

Los resultados del estudio se muestran en el Gráfico 5-8, Gráfico 5-9 y la Tabla 5-7.

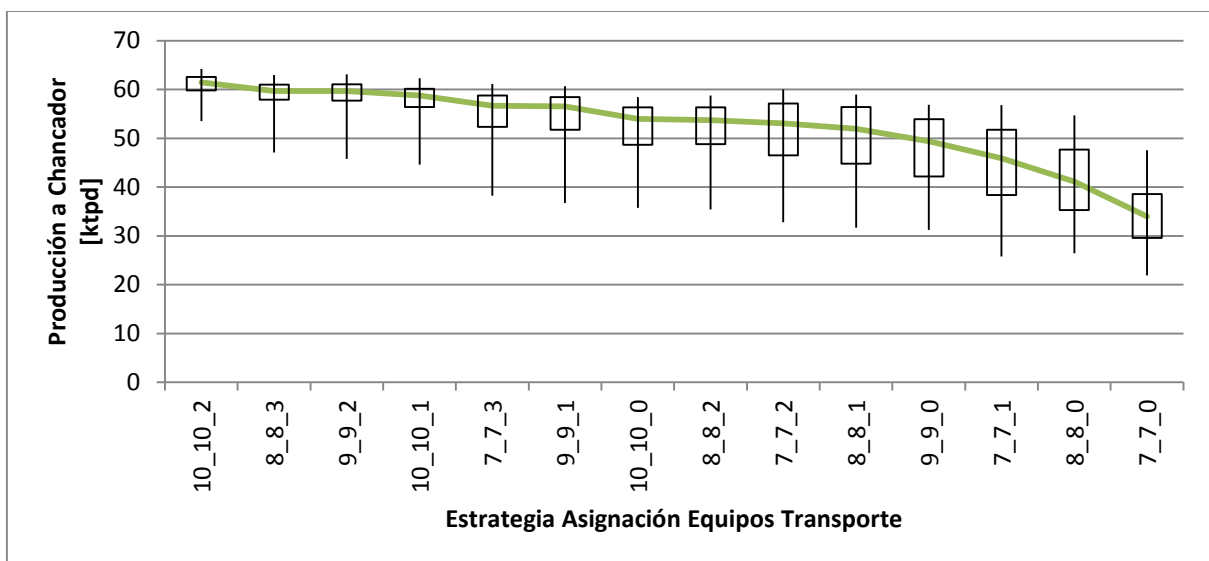


Gráfico 5-8: Boxplot Producción a Chancador para distintas asignaciones Equipos de Transporte a Frentes de Carga

Estadística	10_10_2	8_8_3	9_9_2	10_10_1	7_7_3	9_9_1	10_10_0	8_8_2	7_7_2	8_8_1	9_9_0	7_7_1	8_8_0	7_7_0
Q1	59.9	57.9	57.7	56.4	52.3	51.7	48.7	48.8	46.5	44.8	42.2	38.4	35.3	29.6
L_inf(95%)	53.5	47.1	45.8	44.6	38.3	36.8	35.8	35.4	32.8	31.7	31.2	25.8	26.4	21.9
Media	61.5	59.7	59.7	58.8	56.7	56.6	54.0	53.7	53.1	52.0	49.4	45.9	41.2	34.0
L_sup(95%)	64.2	63.0	63.1	62.3	61.1	60.7	58.5	58.8	60.0	59.0	56.9	56.8	54.7	47.6
Q3	62.6	61.0	61.1	60.2	58.8	58.5	56.4	56.4	57.2	56.4	54.0	51.8	47.7	38.6
Mediana	60.9	58.7	58.5	57.5	54.7	54.1	51.8	51.8	51.0	49.9	47.6	44.6	41.3	34.2
Varianza	7.8	14.7	20.1	21.3	36.0	40.3	37.8	39.4	57.2	61.6	54.8	74.7	65.2	44.9
Desviación Estándar	2.8	3.8	4.5	4.6	6.0	6.3	6.1	6.3	7.6	7.8	7.4	8.6	8.1	6.7
IQR	2.7	3.1	3.3	3.7	6.5	6.8	7.7	7.5	10.6	11.6	11.8	13.4	12.4	9.0
RIC(alfa)	10.7	15.9	17.3	17.7	22.9	24.0	22.7	23.4	27.2	27.3	25.7	31.0	28.3	25.7
IQR sobre Media	4.5%	5.3%	5.7%	6.5%	11.9%	12.5%	14.9%	14.5%	20.9%	23.2%	24.7%	30.0%	30%	26%
RIC(alfa) partido por Media	18%	27%	30%	31%	42%	44%	44%	45%	53%	55%	54%	69%	69%	75%

Tabla 5-7: Estadísticas Básicas para distintos tipos de Asignaciones Equipos de Transporte a Frentes de Carga

*RIC(alfa): Rango intervalo de confianza para una confiabilidad alfa.

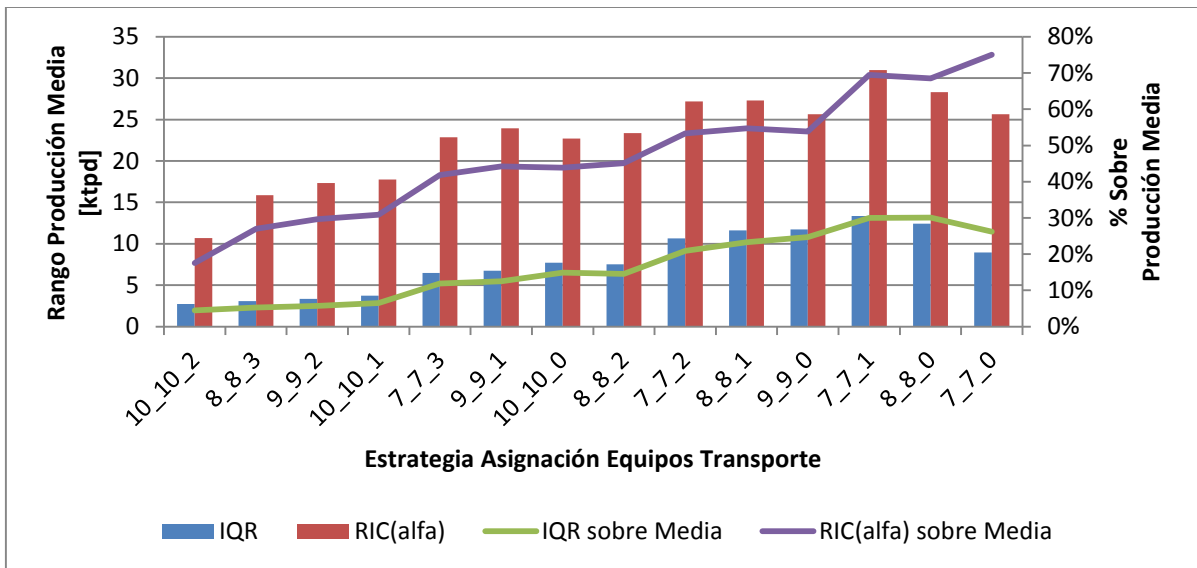


Gráfico 5-9: Rango absoluto y relativo a la producción media para cada estrategia de asignación de equipos de transporte

A partir del Gráfico 5-8, Gráfico 5-9 y la Tabla 5-7 se concluye que la mejor estrategia de asignación de equipos es la estrategia 10_10_2, puesto que entrega una mayor producción al chancador con una menor variabilidad. Esta estrategia es la que será usada de aquí en adelante para los siguientes estudios.

5.5 Impacto en producción ante sensibilidad de medias de parámetros operacionales

Los resultados obtenidos son los siguientes.

5.5.1 Factor de carga

Los resultados obtenidos son los siguientes.

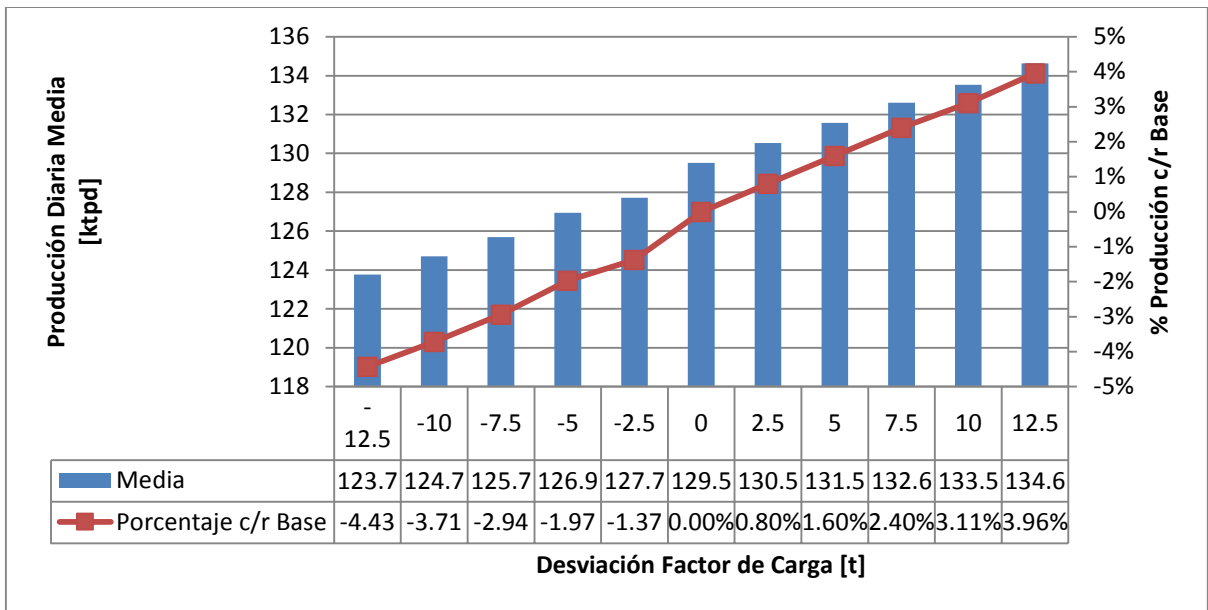


Gráfico 5-10: Sensibilidad Factor de Carga (ECDvar) 1000rep

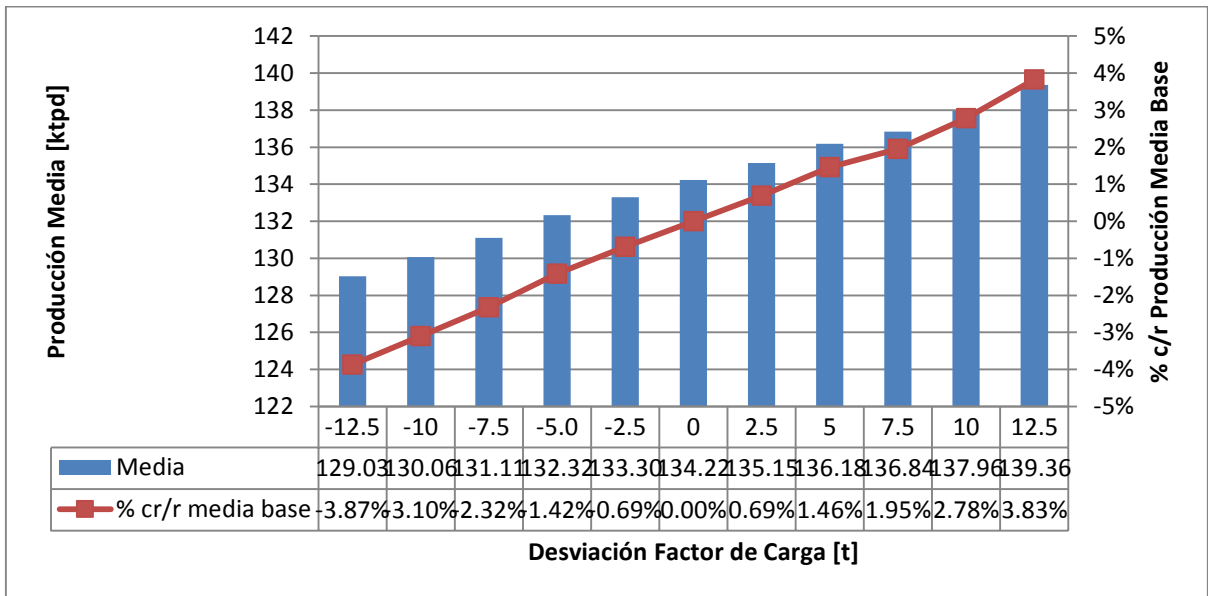


Gráfico 5-11: Sensibilidad Factor de Carga (ECDTfijo)

El impacto del factor de carga en la producción es lineal en toda la banda de desviación del factor de carga, lo cual es esperable. Esta linealidad es coherente con el hecho de que el aumento del factor de carga tiene influencia solamente en la cantidad de material cargado por los equipos de carga y no tiene ninguna influencia indirecta en los tiempos de carga, tiempos de descarga y tiempo de chancado.

5.5.2 Tiempo de carga

Los resultados obtenidos son los siguientes.

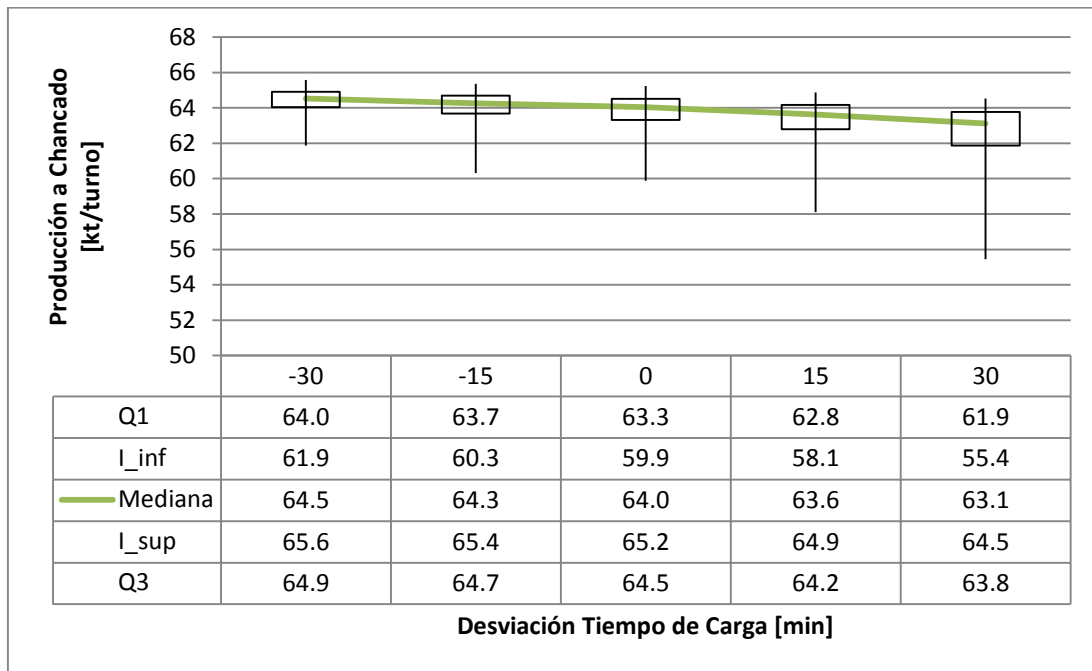


Gráfico 5-12: Sensibilidad Tiempo de Carga (ECDTfijo)

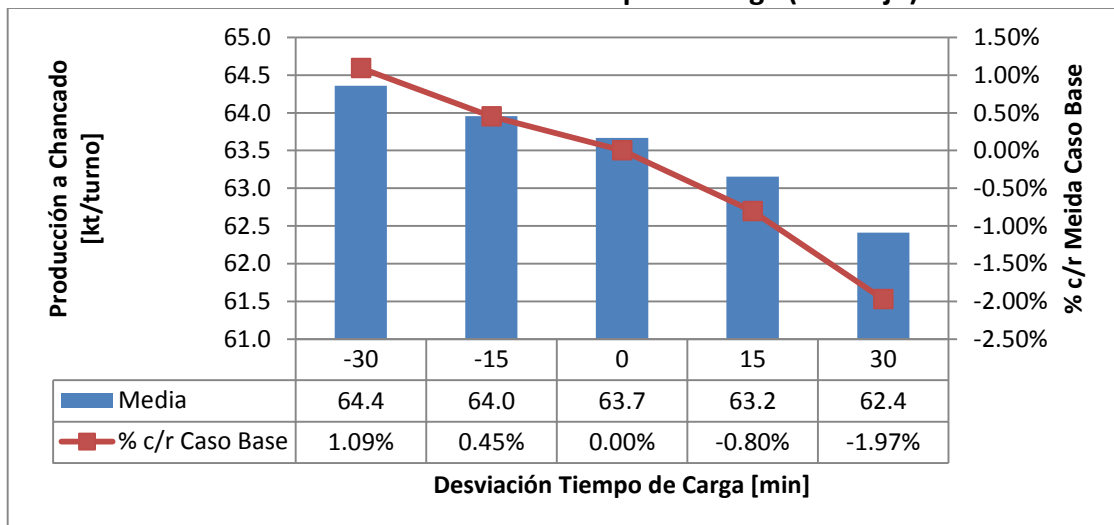


Gráfico 5-13: Sensibilidad Tiempo de Carga (ECDTfijo)

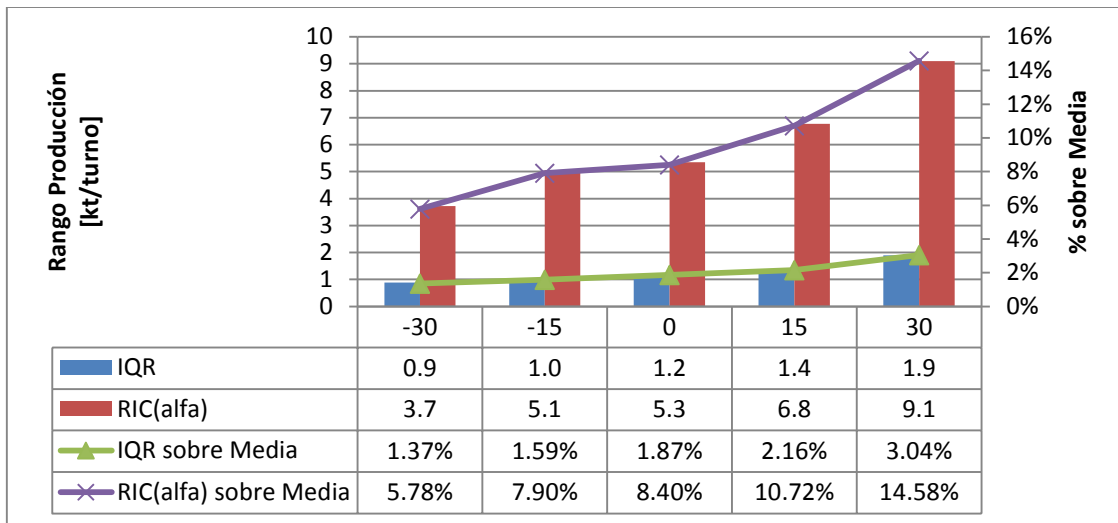


Gráfico 5-14: Estadísticos de dispersión absolutos y relativos a la media. Sensibilidad tiempo de carga (ECfijo)

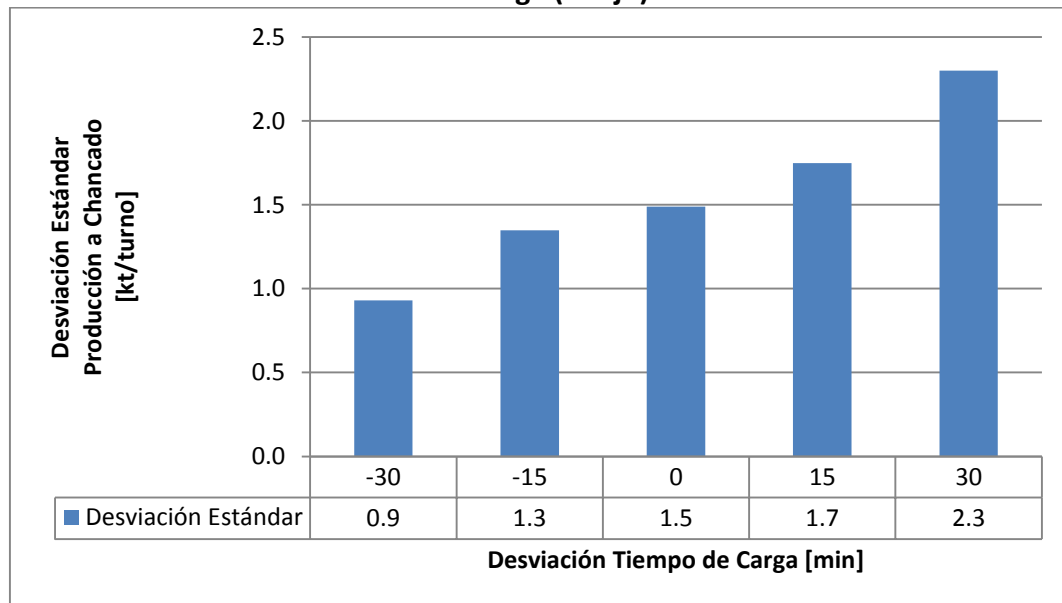


Gráfico 5-15: Desviación Estándar. Sensibilidad Tiempo de Carga

Al aumentar el tiempo de carga se observa una disminución de la producción a chancado, lo cual es evidente. En cuanto a la variabilidad, las estadísticas de dispersión de datos (IQR, RIC y desviación estándar) muestran que al aumentar el tiempo de carga, aumenta la desviación de la producción con respecto a las medidas de tendencia central.

5.5.3 Velocidad aislada camión

Los resultados obtenidos son los siguientes.

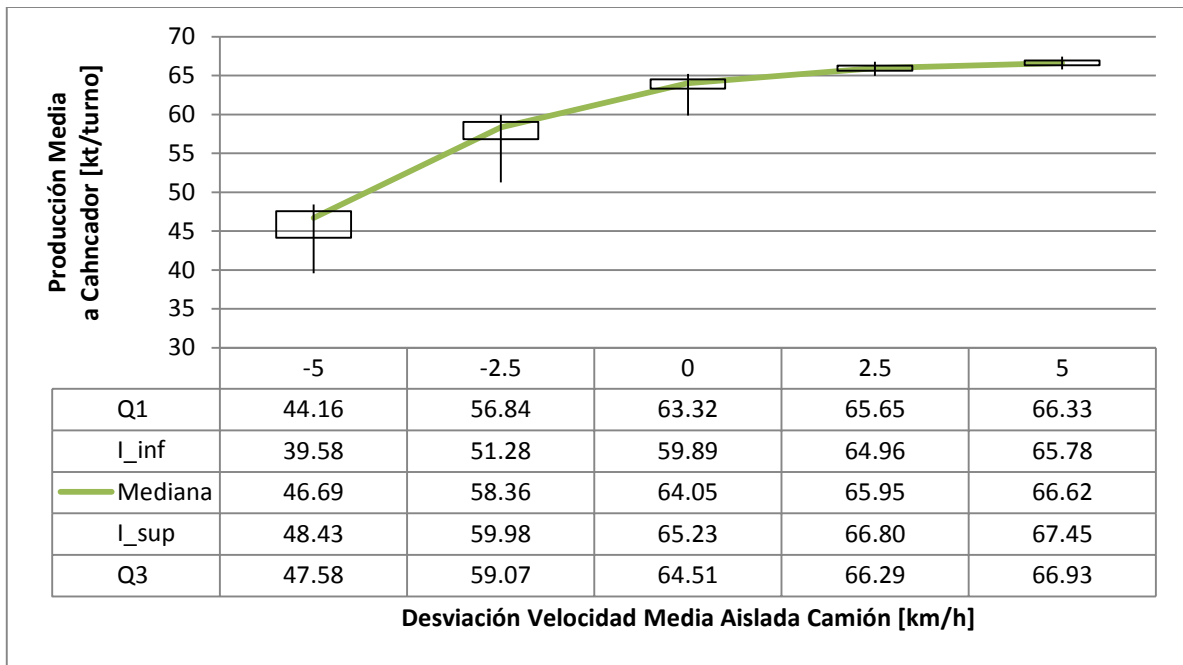


Gráfico 5-16: Sensibilidad Velocidad Media Aislada (ECDTfijo)

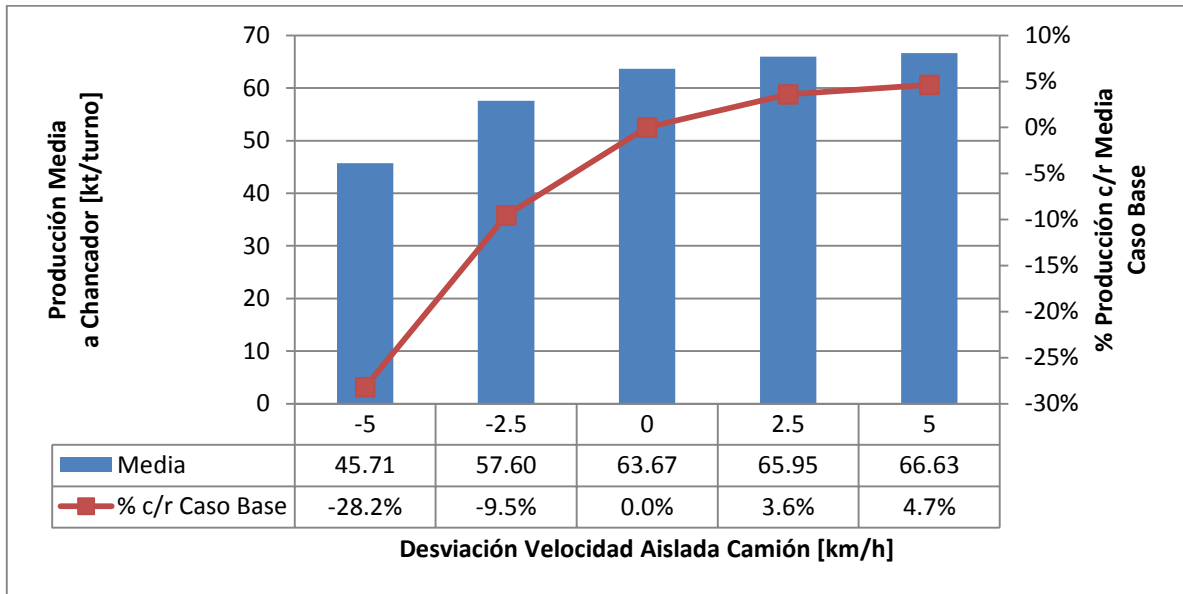


Gráfico 5-17: Sensibilidad Velocidad Media Aislada (ECDTfijo)

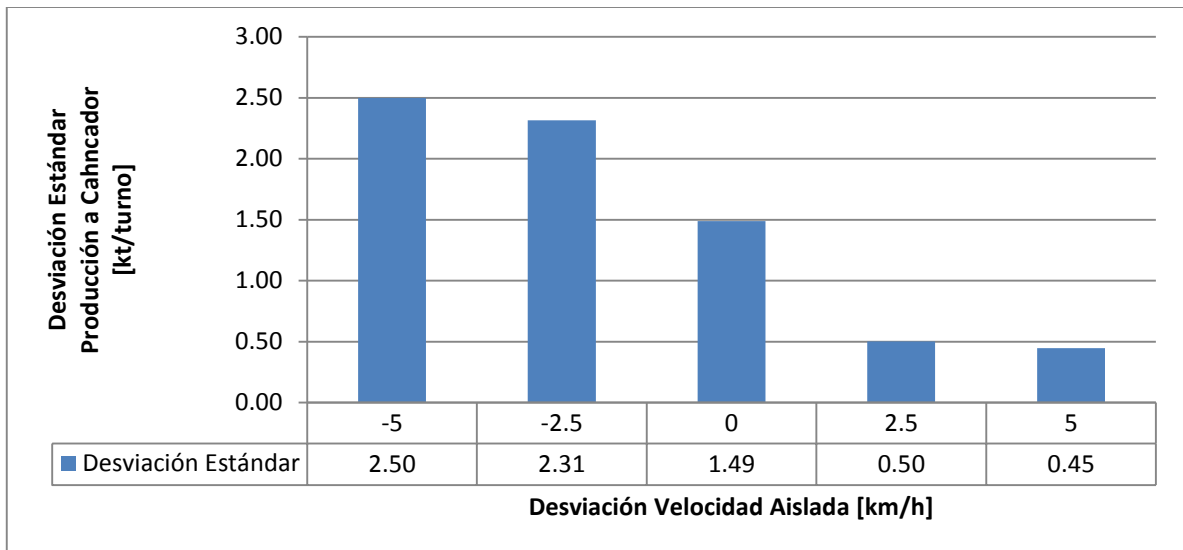


Gráfico 5-18: Desviación Estándar. Sensibilidad Velocidad Media Aislada.

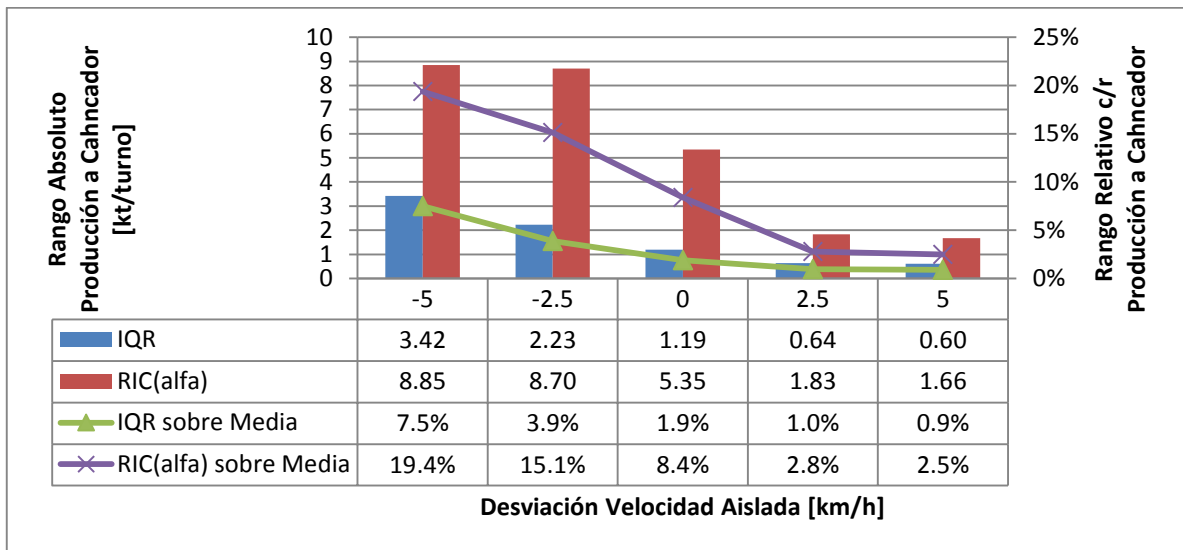


Gráfico 5-19: Estadísticos de dispersión absolutos y relativos a la media. Sensibilidad tiempo de carga (ECfijo)

Se observa un comportamiento creciente de la producción conforme aumenta la velocidad media aislada. Sin embargo, este crecimiento no es lineal, si no que el impacto en su crecimiento es cada vez menor, eventualmente alcanzando una cota superior. El origen de la saturación se explica en las esperas en cola en las locaciones de carga y descarga, en donde los tiempos de servicio no son lo suficientemente rápidos para capitalizar el aumento de la velocidad aislada en producción.

Con respecto a la variabilidad, se tiene que al aumentar la velocidad aislada, las estadísticas de dispersión (IQR, RIC, desviación estándar) disminuyen su valor, por lo que se tiene una menor variabilidad de la producción conforme la

velocidad aislada aumenta. Sin embargo, esta disminución de la variabilidad también alcanza una cota inferior.

5.6 Evaluación de sistema de manejo de materiales bajo modelos de ausencia de producción en equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales

5.6.1 Comparación de producción media por turno

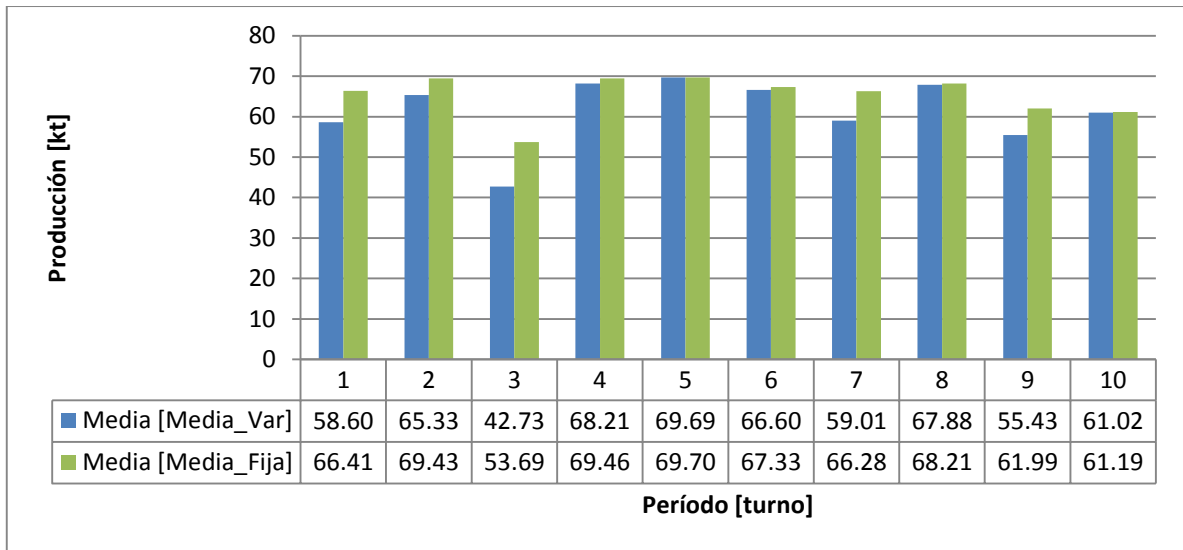


Gráfico 5-20: Comparación de producción bajo escenario Media_Var y Media_Fija.

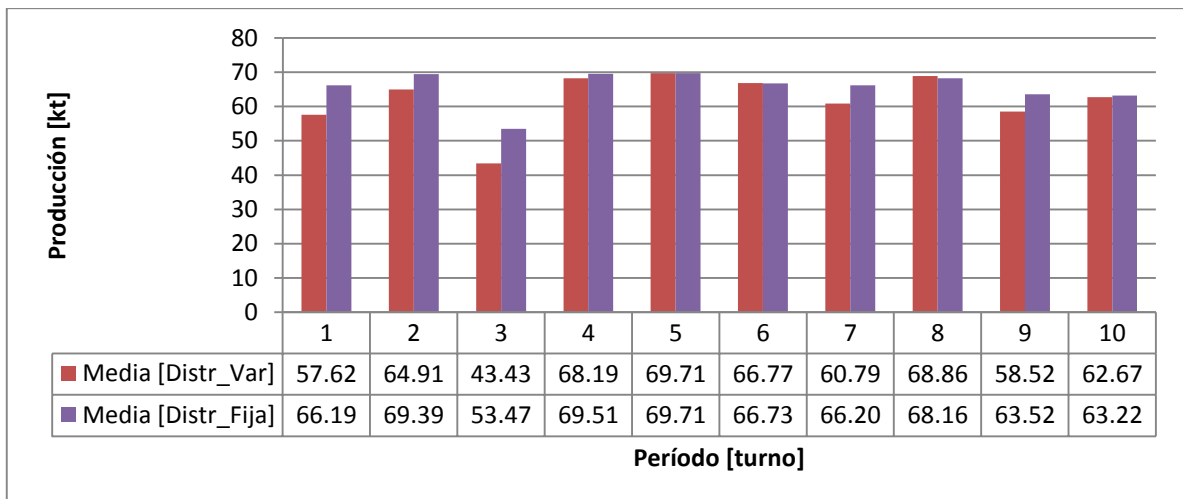


Gráfico 5-21: Comparación de producción bajo escenario Distr_Var y Distr_Fija.

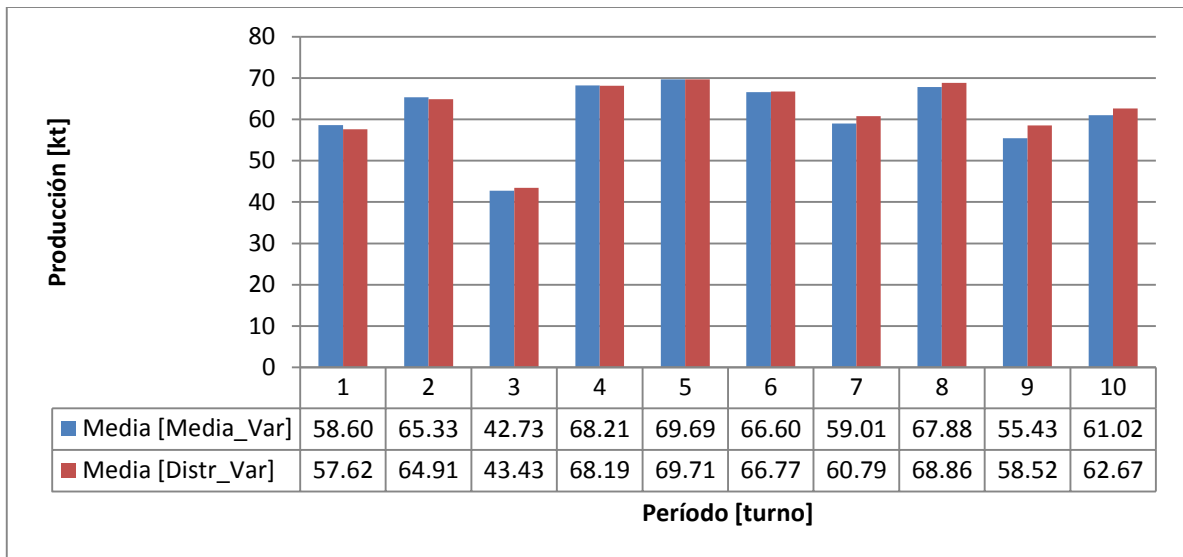


Gráfico 5-22: Comparación de producción bajo escenario Media_Var y Distr_Var.

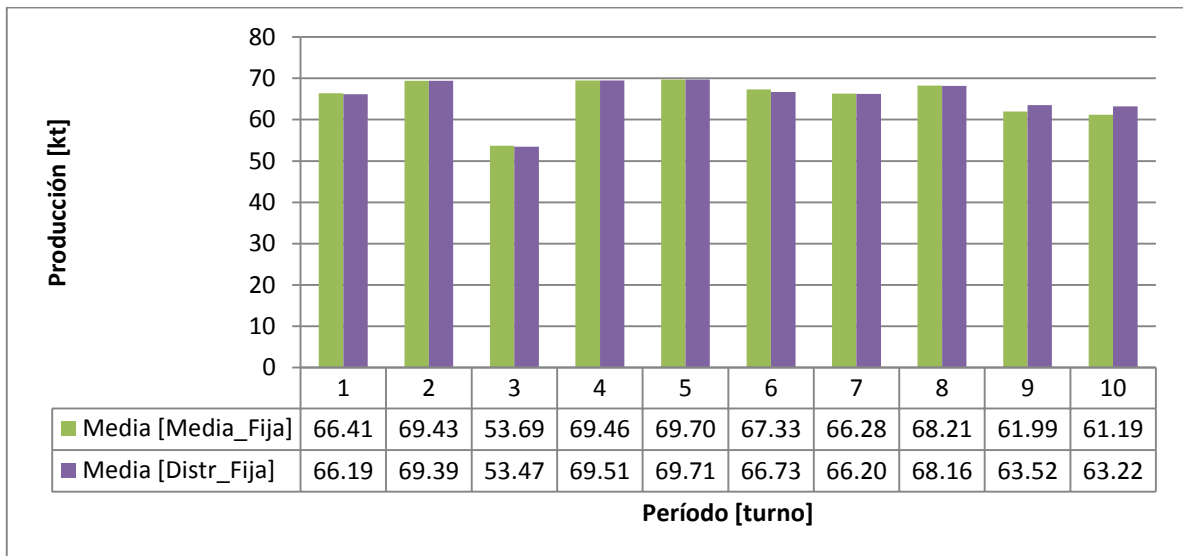


Gráfico 5-23: Comparación de producción bajo escenario Media_Fija y Distr_Fija.

A partir del Gráfico 5-20, se tiene que para cada período, el promedio de la producción del escenario Media_Var es menor al escenario Media_Fija. Esto se explica debido a la naturaleza variable de los tiempos en ausencia de producción en los equipos de carga, en donde en el escenario Media_Var son variables, mientras que en el escenario Media_Fija son fijas de manera de obtener un traslape mínimo entre tiempos en ausencia de producción entre equipos de carga.

A partir del Gráfico 5-21, se tiene que para cada período, el promedio de la producción del escenario Distr_Var es menor al escenario Distr_Fija. Esto se

explica debido a la naturaleza variable de los tiempos en ausencia de producción en los equipos de carga, en donde en el escenario Distr_Var son variables, mientras que en el escenario Distr_Fija son fijas de manera de obtener un traslape mínimo entre tiempos en ausencia de producción entre equipos de carga.

A partir del Gráfico 5-21, se tiene que para cada período, el promedio de la producción del escenario Media_Var es similar al escenario Distr_Var. Esto se explica debido a la cantidad de ciclos realizados en cada una de las réplicas. Bajo el escenario Distr_Var los parámetros operacionales de naturaleza estocástica inciden solamente en el tiempo de ciclo y cantidad de carga transportada, por lo que a un mayor número de ciclos, las diferencias introducidas debido a la naturaleza estocástica de los parámetros operacionales se diluyen y tienden a comportarse de forma similar al escenario Media_Var, en donde los parámetros operacionales son de naturaleza determinista.

De forma similar a la comparación entre los escenarios Media_Var y Distr_Var, se tiene que a partir del Gráfico 5-23, para cada período, el promedio de la producción del escenario Media_Fija es similar al escenario Distr_Fija. Esto se explica debido a la cantidad de ciclos realizados en cada una de las réplicas. Bajo el escenario Distr_Fija los parámetros operacionales de naturaleza estocástica inciden solamente en el tiempo de ciclo y cantidad de carga transportada, por lo que a un mayor número de ciclos, las diferencias introducidas debido a la naturaleza estocástica de los parámetros operacionales se diluyen y tienden a comportarse de forma similar al escenario Media_Fija, en donde los parámetros operacionales son de naturaleza determinista.

5.6.2 Resultados a 1 turno

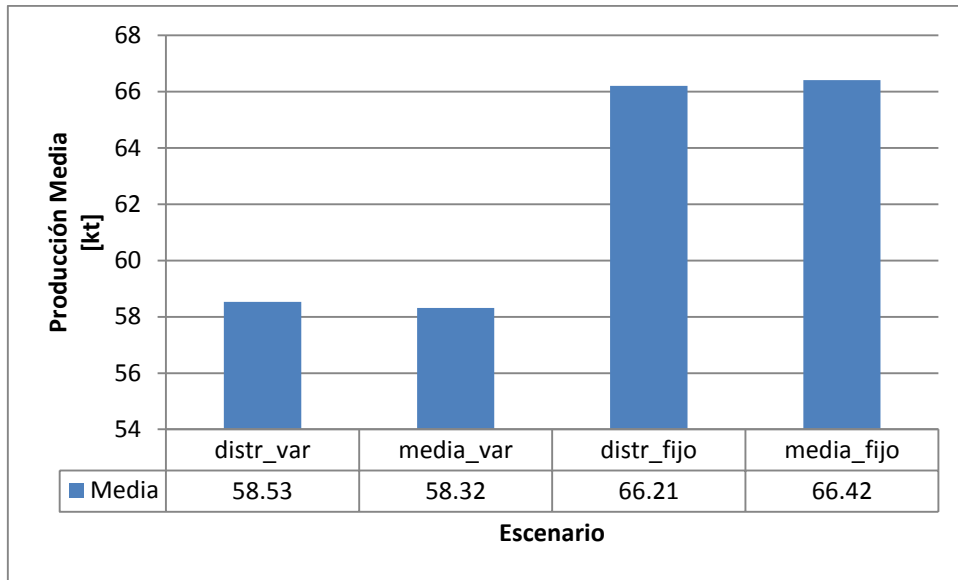


Gráfico 5-24: Producción Media vs Escenario

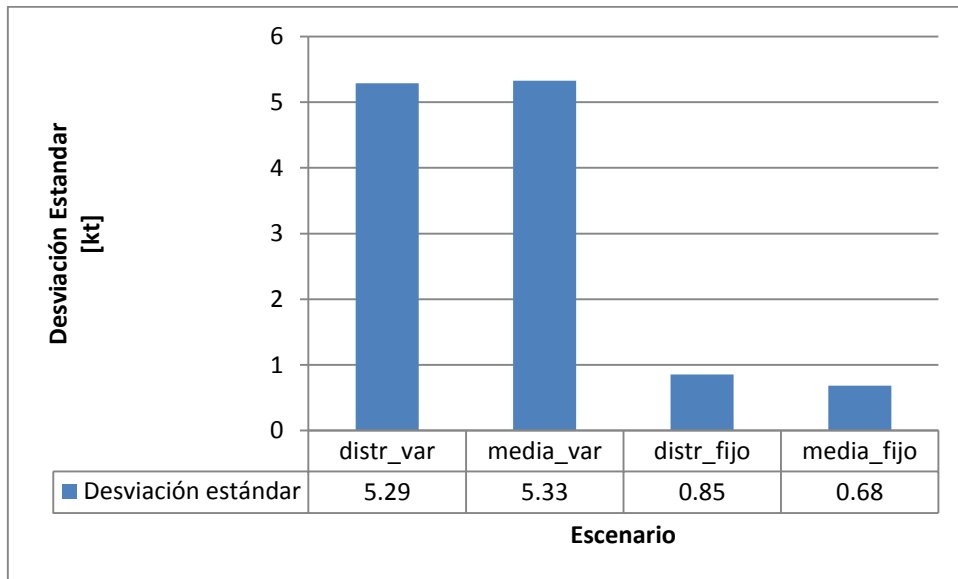


Gráfico 5-25: Desviación Estándar Producción vs Escenario

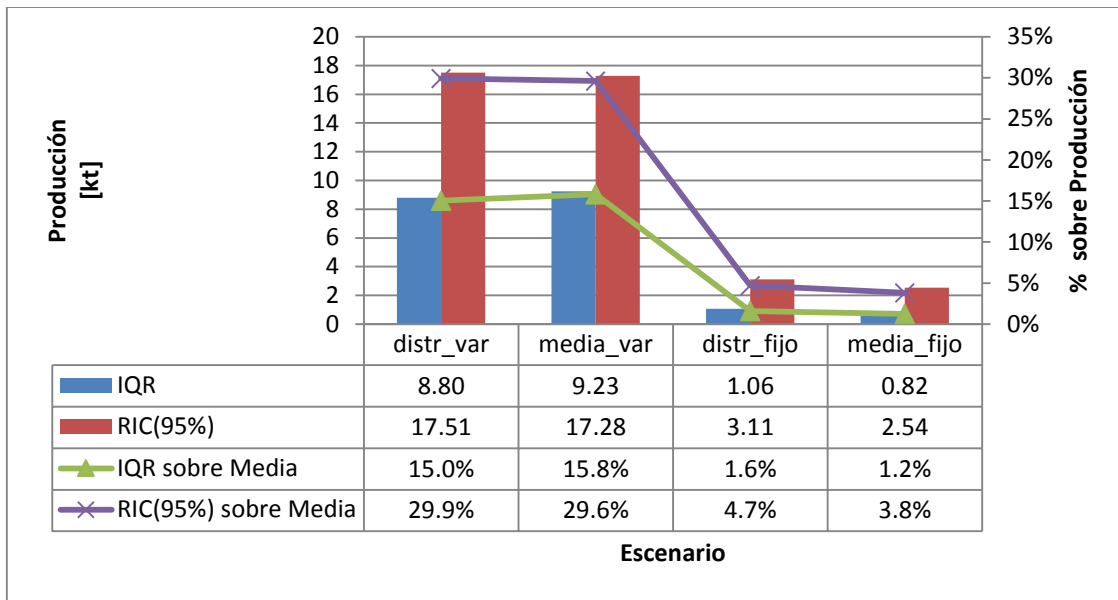


Gráfico 5-26: IQR y RIC(95%) absolutos y relativos a la producción media vs escenarios

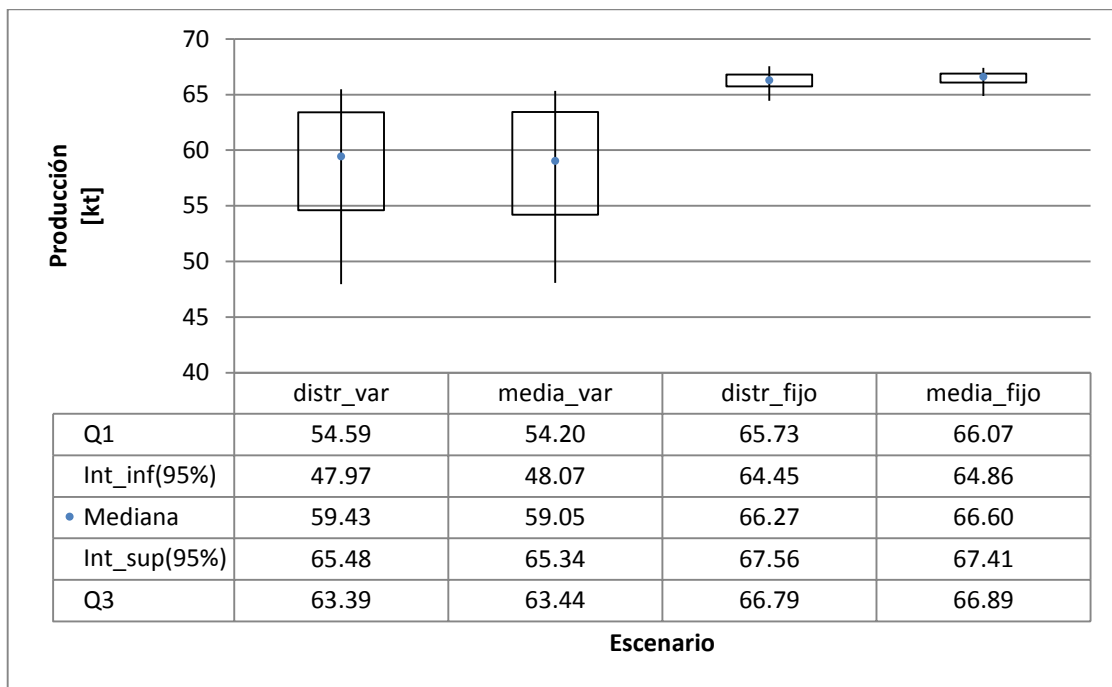


Gráfico 5-27: Boxplot de Producción vs Escenarios

A continuación se grafican las distribuciones empíricas, tanto absolutas como relativas de la producción total para todos los escenarios estudiados.

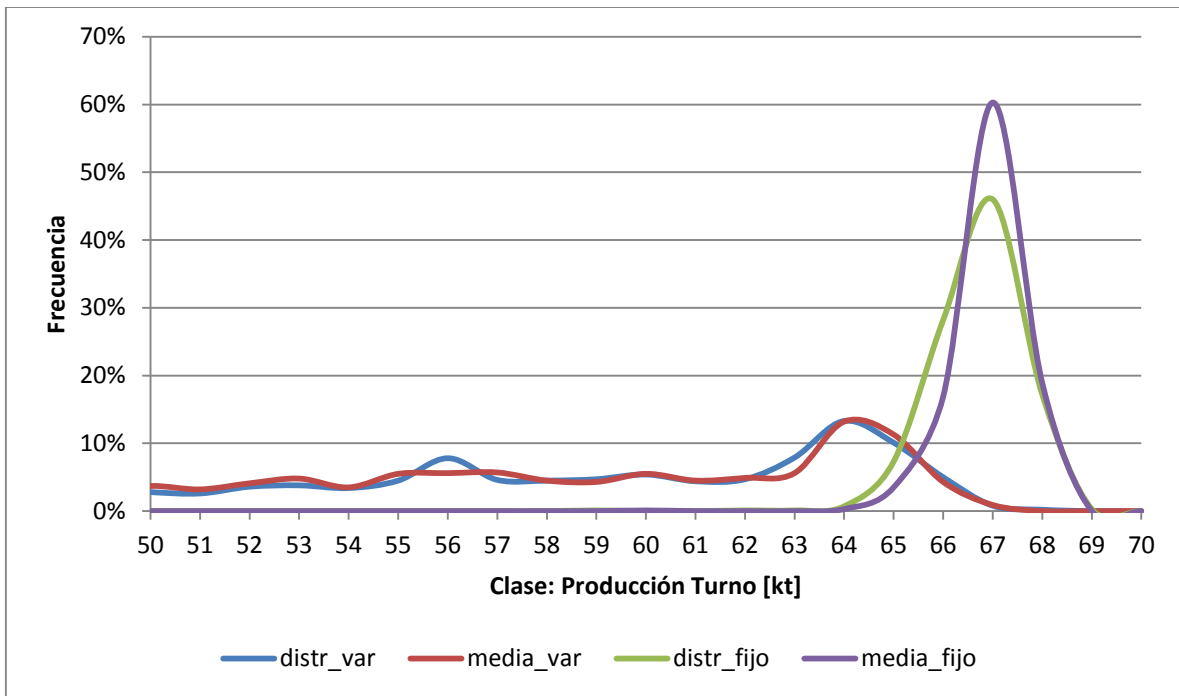


Gráfico 5-28: Distribución Empírica vs Escenarios

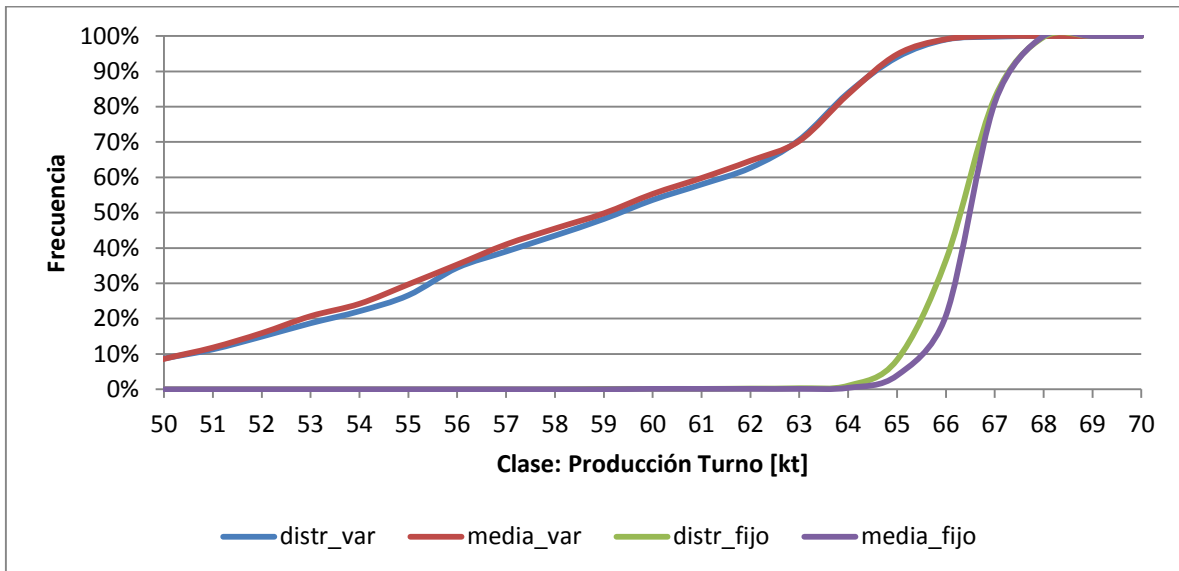


Gráfico 5-29: Distribución Acumulada Empírica vs Escenarios

A partir del análisis del Gráfico 5-24 se desprende lo siguiente:

- Las medias de los parámetros operacionales de los escenarios con modelos de ausencia de producción de equipos de carga variable obtienen medias de producción menores a los escenarios con modelos

de ausencia de producción de equipos de carga fija con superposición mínima.

- No existe diferencia significativa entre las medias alimentadas con parámetros operacionales deterministas y estocásticos, para un mismo tipo de modelos de ausencia de producción de equipos de carga.

A partir del análisis del Gráfico 5-25 se desprende lo siguiente:

- Los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción variable en equipos de carga poseen desviaciones estándar mayores a los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción fija en equipos de carga con superposición mínima.
- Las desviaciones estándar de la producción entre escenarios que comparten el mismo tipo de modelo en ausencia de producción de equipos de carga son similares.

A partir del análisis del Gráfico 5-25 se desprende lo siguiente:

- Los escenarios que cuentan con el modelo de ausencia de producción variable poseen estadísticas de dispersión IQR y RIC(95%) mayores a los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción fijo en equipos de carga con superposición mínima.
- Las estadísticas de dispersión IQR y RIC(95%) de la producción entre escenarios que comparten el mismo tipo de modelo de ausencia de producción en equipos de carga son similares.

A partir del análisis del Gráfico 5-27 se desprende lo siguiente:

Los gráficos de caja, los cuales resumen la distribución de la producción, tienen formas similares en los escenarios en donde se tienen el mismo tipo de modelo en ausencia de producción de equipos de carga.

Para el caso de escenarios con modelo en ausencia de producción variable, la mediana está cerca del centro de la caja, por lo que la distribución tiene tendencia a ser simétrica. El bigote del intervalo inferior tiende a ser mayor al bigote del intervalo superior por dos aspectos:

- Bigote del intervalo superior corto: Se explica por la limitante física del chancador. El sistema posee una cota superior límite explicada por condiciones físicas del área de descarga en chancador.
- Bigote del intervalo inferior largo: Se explica por la incidencia de algunas réplicas en donde existe una alta ocurrencia del traslape de tiempos en ausencia de operación entre dos o más equipos de carga lo cual impacta en producciones más bajas.

Para escenarios con modelo en ausencia de producción fijo con superposición mínima, el tamaño de los bigotes es explicado a continuación:

- Bigote del intervalo superior corto: Se explica por la limitante física del chancador. El sistema posee una cota superior límite explicada por condiciones físicas del área de descarga en chancador.
- Bigote del intervalo inferior corto: Debido al agendamiento de tiempos en ausencia de producción fijo con traslape mínimo entre equipos de carga, no existen réplicas en donde exista una alta ocurrencia del traslape de tiempos en ausencia de operación entre dos o más equipos de carga.

A partir del análisis del Gráfico 5-28 y Gráfico 5-29, se observa la similitud de las distribuciones entre escenarios que tienen tipos de modelos en ausencia de producción para equipos de carga iguales.

Esto reafirma la conclusión que el aporte de valor de la alimentación de parámetros operacionales por medias o por distribuciones no es relevante.

5.6.3 Resultados a 10 turnos

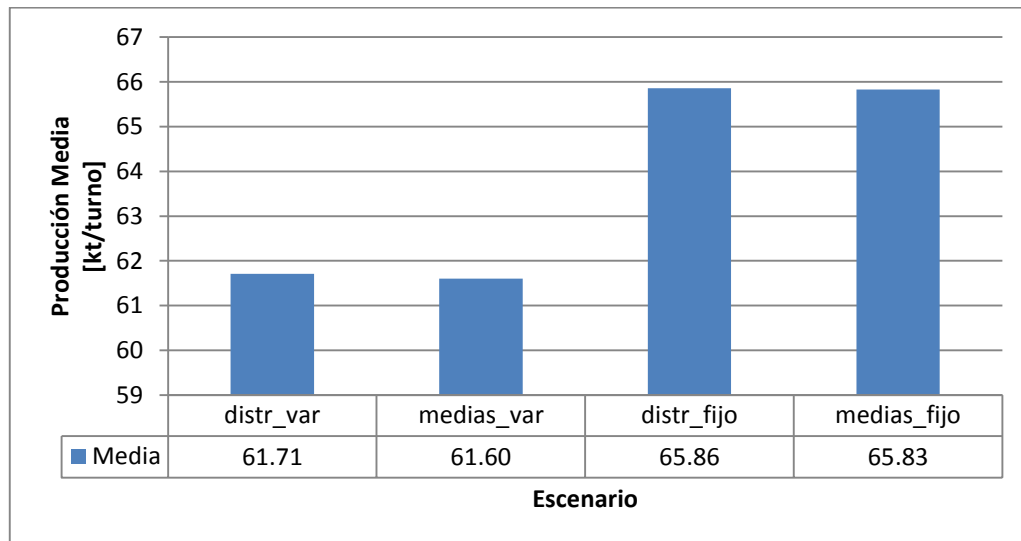


Gráfico 5-30: Producción Media vs Escenario

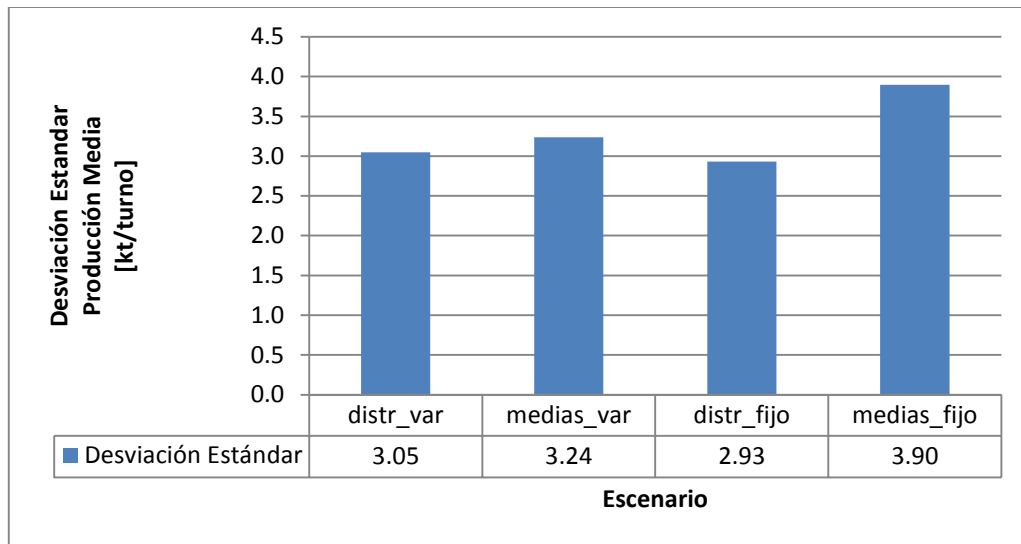


Gráfico 5-31: Desviación Estándar Producción vs Escenarios

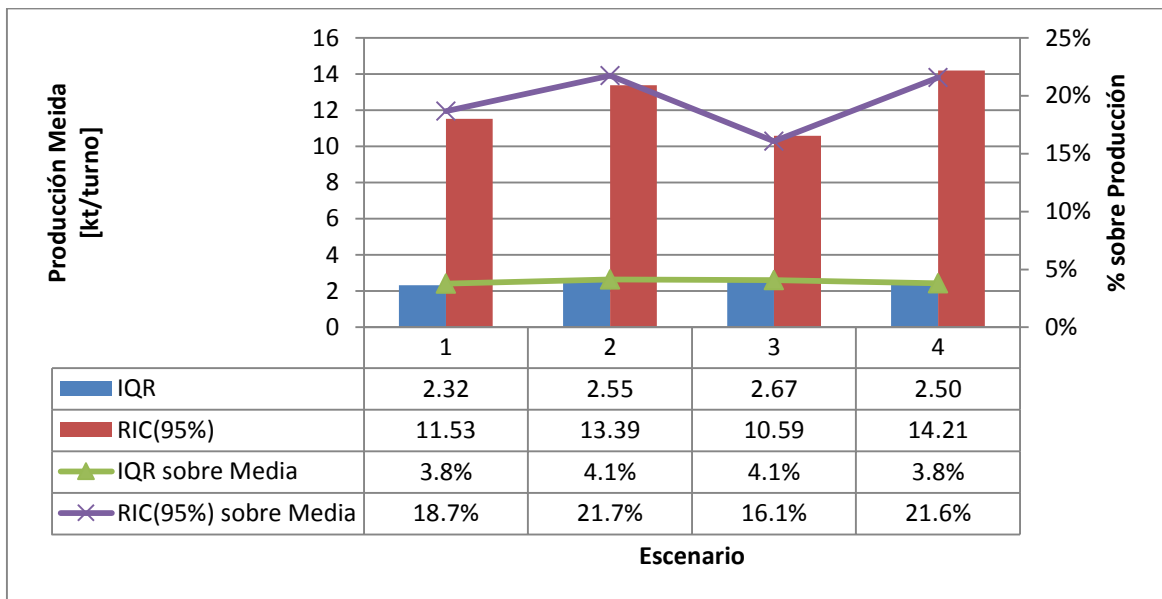


Gráfico 5-32: IQR y RIC(95%) absolutos y relativos a la producción media vs escenarios

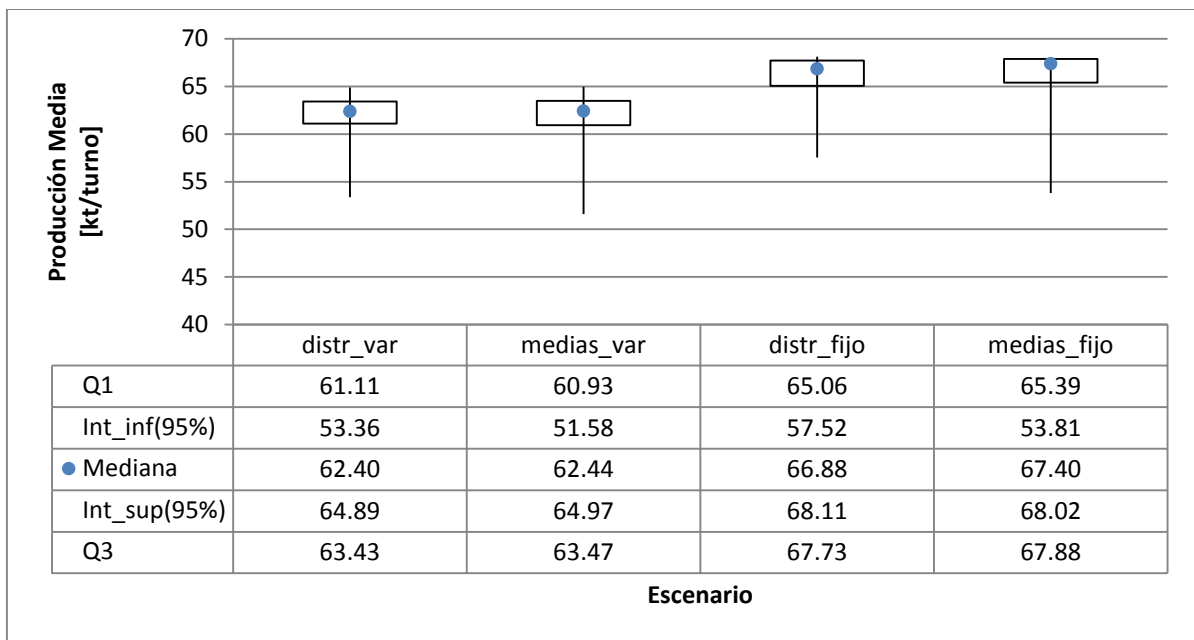


Gráfico 5-33: Diagrama de caja producción sobre escenarios

A continuación se grafican las distribuciones empíricas, tanto absolutas como relativas de la producción total para todos los escenarios estudiados.

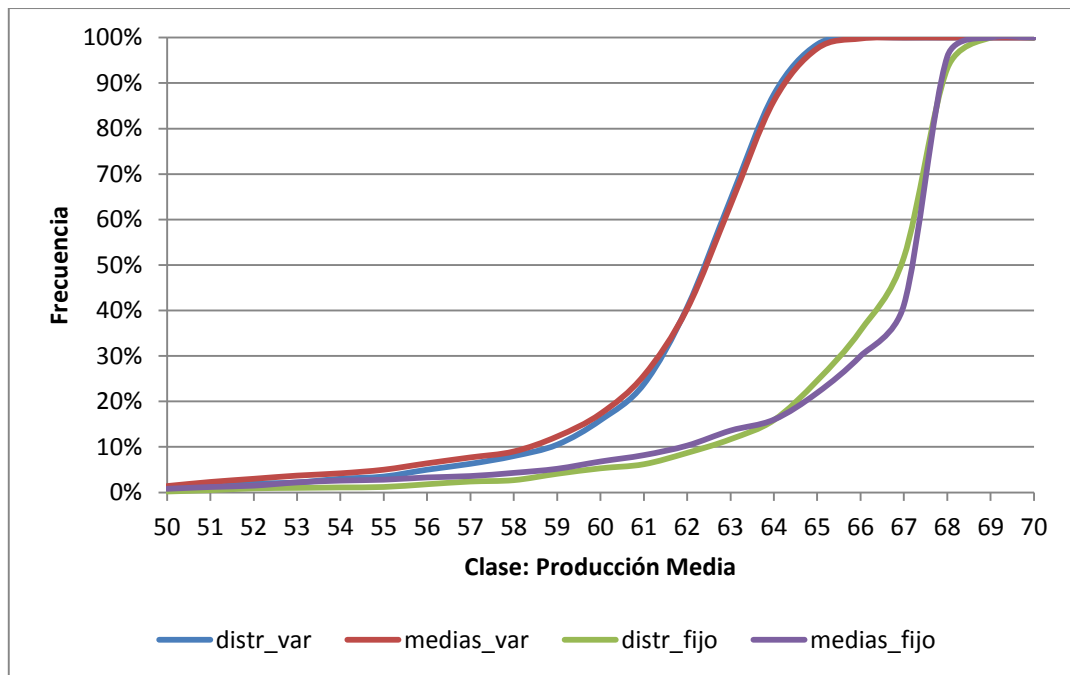


Gráfico 5-34: Distribución Acumulada Empírica vs Escenarios

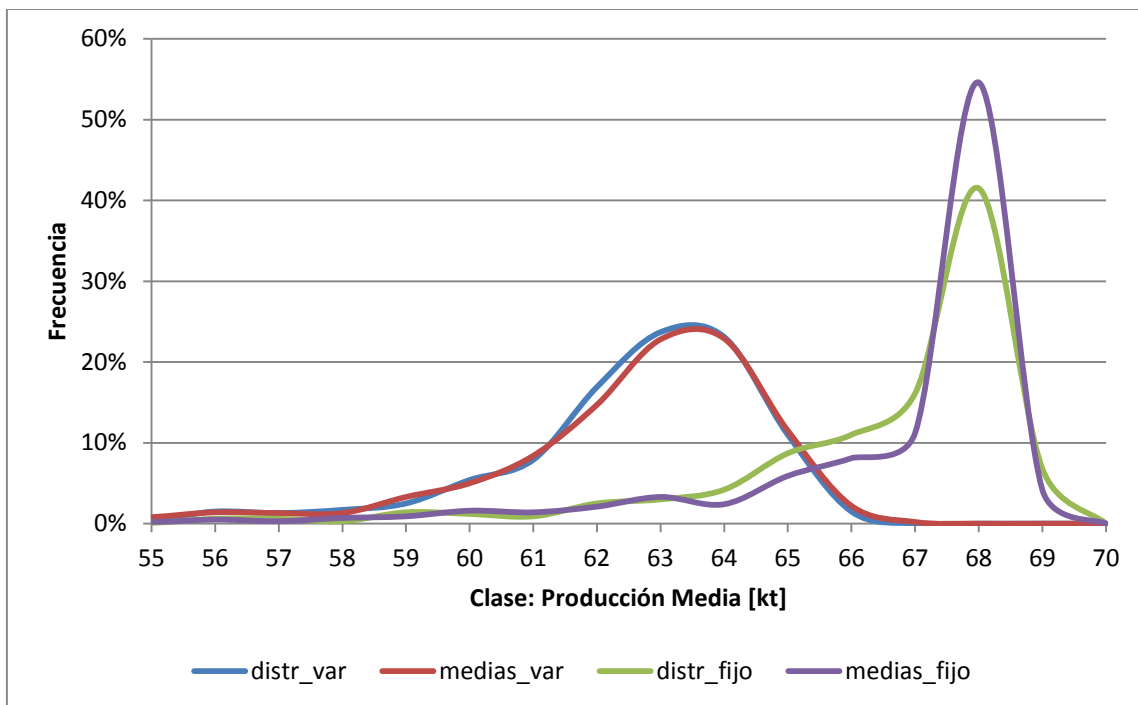


Gráfico 5-35: Distribución Empírica vs Escenarios

Finalmente, por completitud, se reporta el plan de movimiento de material esperado por turno, para cada uno de los escenarios definidos en la sección 13.10.

A partir del análisis del Gráfico 5-25 se desprende lo siguiente:

- Similarmente al caso de 1 turno, se observa que las medias de los parámetros operacionales de los escenarios con modelos ausencia de producción variable en equipos de carga obtienen medias de producción menores a los escenarios con modelos en ausencia de producción fija en equipos de carga con superposición mínima.
- No existe diferencia significativa entre las medias alimentadas con parámetros operacionales deterministas y estocásticos, para un mismo tipo de modelo en ausencia de operación en equipos de carga.

A partir del análisis del Gráfico 5-31 se desprende lo siguiente:

- A diferencia de lo observado en el caso de 1 turno, los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción variable obtienen desviaciones estándar similares a los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción fijo.

A partir del análisis del Gráfico 5-32 se desprende lo siguiente:

- A diferencia de lo observado en el caso de 1 turno, los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción variable poseen IQR similares a los escenarios que cuentan con el modelo en ausencia de producción fijo.
- El IQR de la producción entre escenarios que comparten el mismo tipo de modelo en ausencia de producción son similares.

A partir del análisis del Gráfico 5-33 se desprende lo siguiente:

Los gráficos de caja, los cuales resumen la distribución de la producción, tienen formas similares en todos los escenarios.

En todos los escenarios estudiados, el bigote del intervalo inferior tiende a ser mayor al bigote del intervalo superior por dos aspectos:

- Bigote del intervalo superior corto: Se explica por la limitante física del chancador. El sistema posee una cota superior límite explicada por condiciones físicas del área de descarga en chancador.
- Bigote del intervalo inferior largo: Se explica por la incidencia de algunas réplicas en donde existe una alta ocurrencia del traslape de tiempos en ausencia de operación entre dos o más equipos de carga lo cual impacta en producciones más bajas.

A partir del análisis del Gráfico 5-34 y Gráfico 5-35, se observa la similitud de las distribuciones entre escenarios que tienen tipos de modelos en ausencia de producción iguales.

Al aumentar el soporte temporal de un plan minero dado, la variabilidad en los resultados en términos de movimiento de material disminuye.

5.7 Estudio de evaluación de sistema de manejo de materiales bajo sensibilidades en tiempo de producción de equipos de carga y transporte

ET \ EC	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
96%	0.47	0.92	1.35	1.73	2.12	2.07	1.58	0.64	0.19	0.10
92%	0.48	0.94	1.41	1.83	2.21	2.26	1.85	0.98	0.66	0.62
88%	0.53	1.07	1.63	1.97	2.48	2.67	2.33	1.73	1.48	1.34
83%	0.56	1.21	1.90	2.60	2.97	3.27	3.12	2.75	2.52	2.38
79%	0.61	1.27	2.38	3.13	3.67	4.16	4.05	3.72	3.48	3.28
75%	0.67	1.38	2.46	3.77	4.10	4.69	4.88	4.74	4.50	4.24
71%	0.74	1.50	2.61	4.01	4.92	5.49	5.77	5.43	5.10	5.11
67%	0.86	1.84	2.92	4.82	5.70	6.27	6.69	6.14	5.69	5.60

Tabla 5-8: Tabla Desviaciones Estándar Producción [kt/turno]. (ECvar)

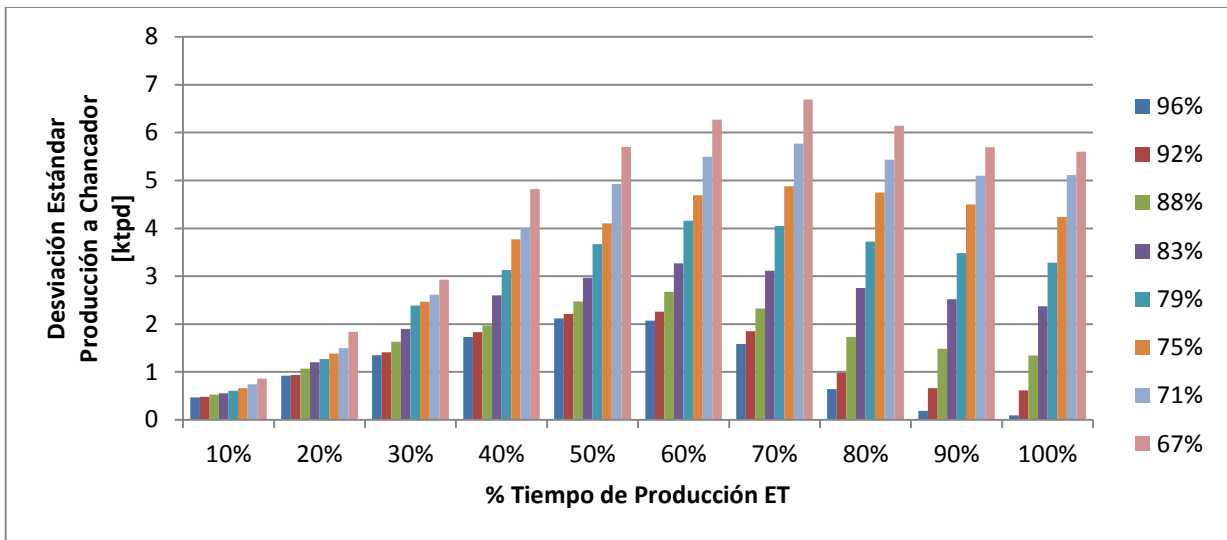


Gráfico 5-36: Desviación Estándar Producción a Chancador para niveles de % Tiempo de Producción de ET y EC. Leyenda: % Tiempo de Producción EC. (ECvar)

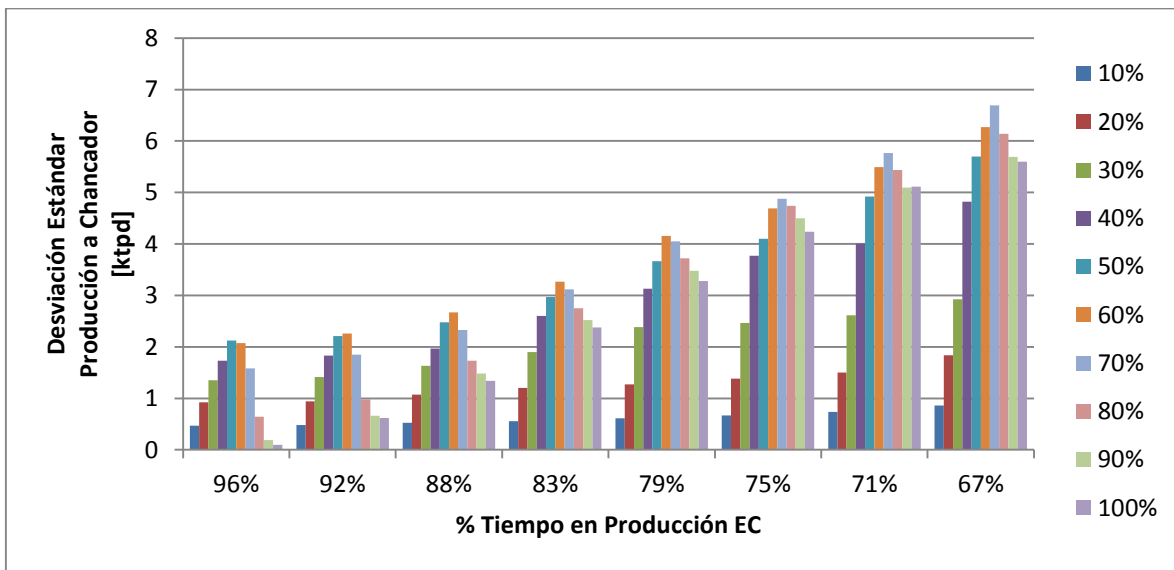


Gráfico 5-37: Desviación Estándar Producción a Chancador para niveles de % Tiempo de Producción de ET y EC. Leyenda: % Tiempo de Producción ET. (ECvar)

- A partir del Gráfico 5-36, se desprende que dado un nivel de % de tiempo en producción de equipos de transporte, la desviación estándar de la producción disminuye conforme aumenta el % de tiempo de producción en equipos de carga. Esto se debe por la reducción de los intervalos de superposición de equipos de carga que se ven disminuidos conforme aumenta el % de tiempo en producción de los equipos de carga. Esto hace que las réplicas que obtienen producciones menores debido a las superposiciones sean menores, lo que hace disminuir la desviación estándar de la producción.

- A partir del Gráfico 5-37, se desprende que dado un nivel de % de tiempo en producción de equipos de carga, la desviación estándar de la producción tiene un comportamiento pseudonormal. Esto se debe a la incidencia de las superposiciones de los camiones. A % de tiempo de producción de camiones bajo, la incidencia de los traslapes es alta, por lo que la producción es baja pero estable. Por otro lado, a % de tiempo de producción de camiones alta, la incidencia de traslapes es baja, por lo que la producción es alta y estable. A % de tiempo de producción medio, la incidencia de los traslapes es máxima, por lo que la producción se mueve entre la producción con % de tiempo en producción de camiones baja y alta, mientras que al mismo tiempo que la desviación de la producción es la más alta.

5.8 Impacto producción frente a coberturas operacionales

En esta sección se muestran los resultados de la producción de material depositado hacia los distintos frentes de descarga, para cada una de las opciones de reasignación de equipos, en función del tiempo de inhabilitación del chancador.

5.8.1 Inhabilitación de chancador primario

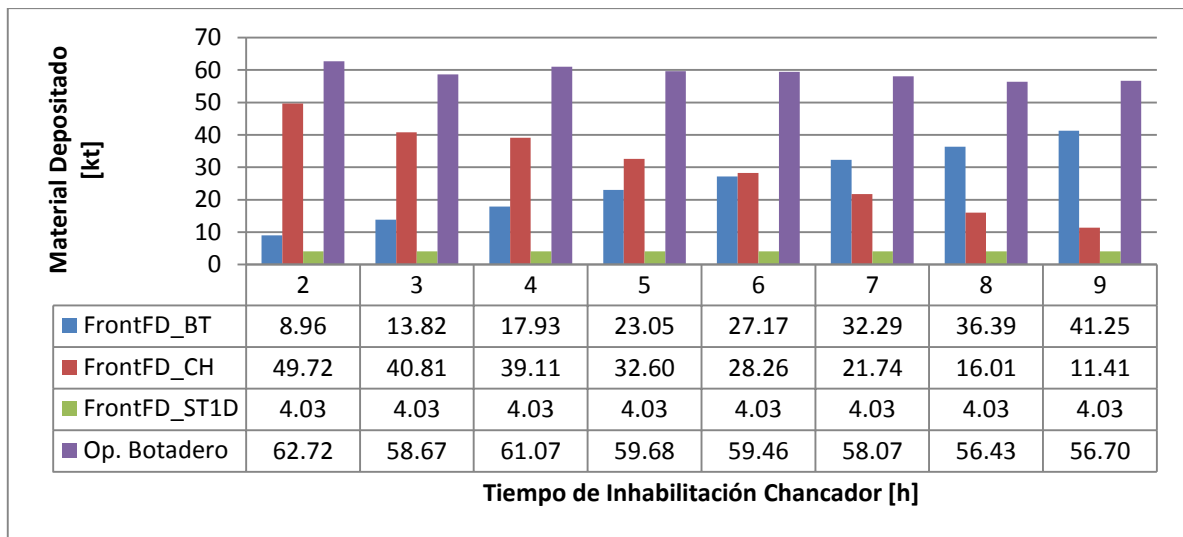


Gráfico 5-38: Material Depositado bajo Inhabilitación descarga chancado. Opción Botadero

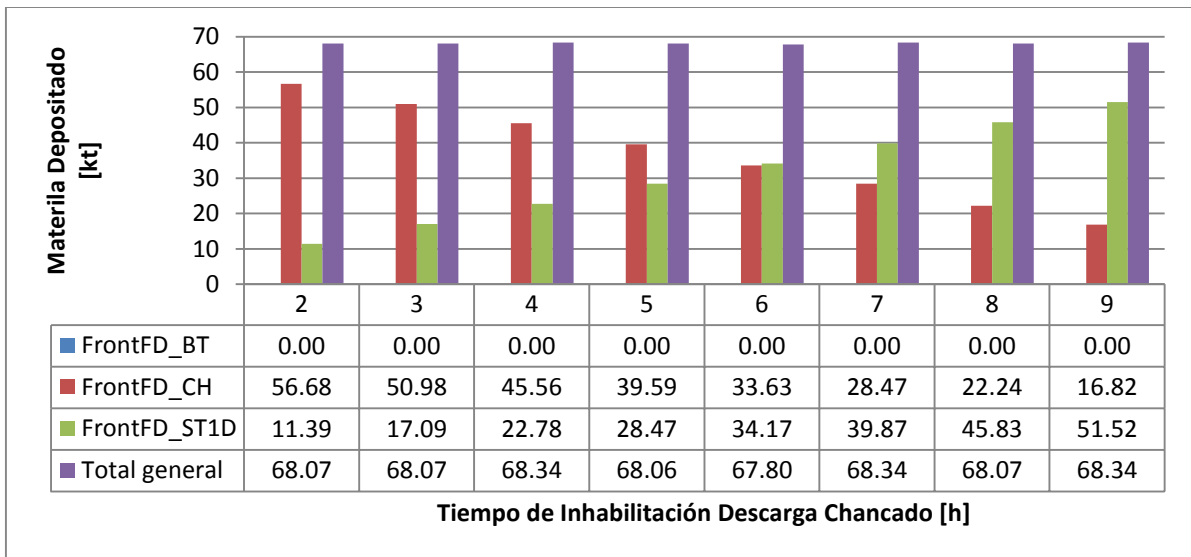


Gráfico 5-39: Material Depositado bajo Inhabilitación descarga chancado. Opción Stock

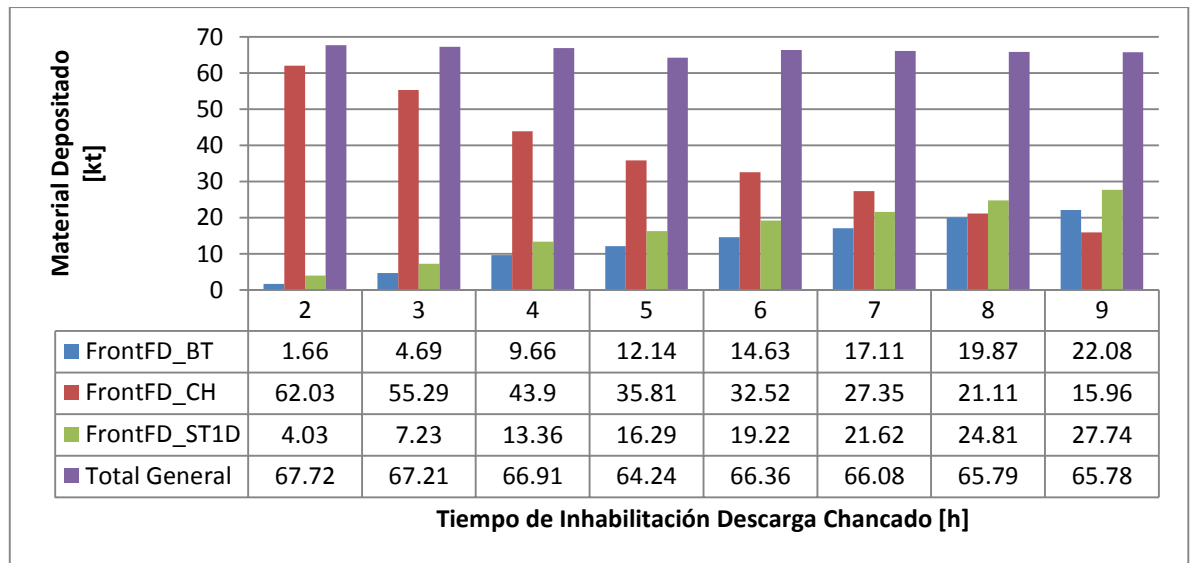


Gráfico 5-40: Material depositado bajo inhabilitación descarga chancado. Opción Stock Botadero

Un criterio para decidir entre las opciones de reasignación puede ser el material total depositado en las frentes de descarga. Esta información se entrega en Gráfico 5-41.

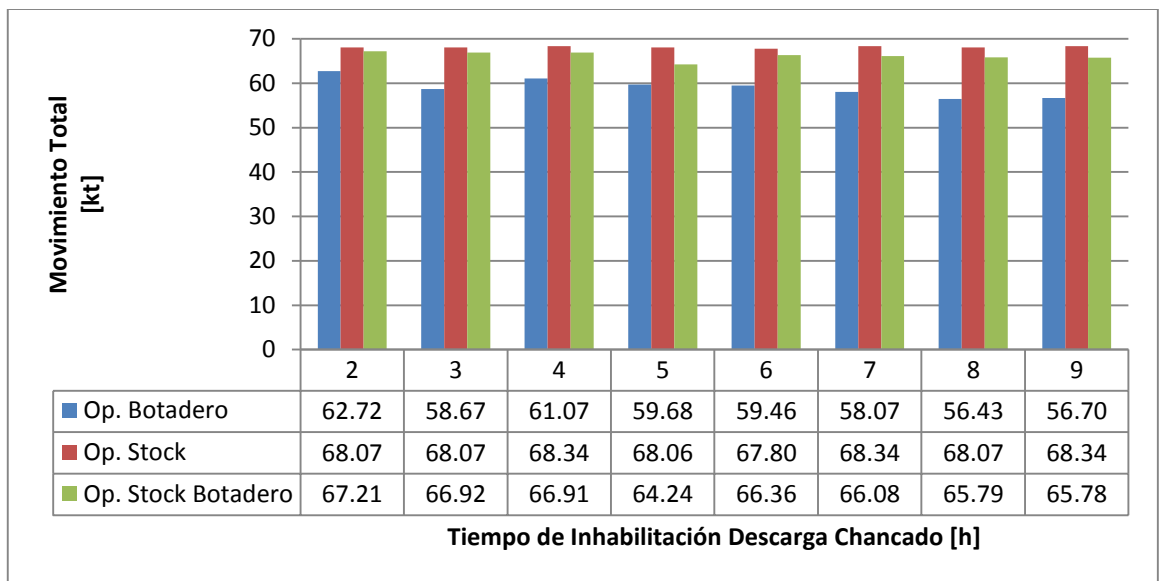


Gráfico 5-41: Comparación movimiento total material entre opciones

A partir del Gráfico 5-39 se desprende que:

- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, disminuye el mineral depositado al chancador.
- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, aumenta el estéril depositado en botadero, puesto que la opción Botadero involucra el cambio de postura secuencial de los equipos de carga desde frentes de mineral a frentes de estéril y posteriormente su retorno al frente de mineral una vez retomada la producción en el chancador.
- La cantidad de mineral depositado en stock no depende de la cantidad de tiempo en ausencia de producción del chancador, puesto que el mineral depositado en stock se explica por una reasignación dinámica del destino: los camiones que inicialmente iban a depositar en chancador cambian su destino a stock puesto que la falla del chancador ocurre en algún instante de tiempo en que los camiones iban viajando cargados a vaciar al chancador.

A partir del Gráfico 5-39 se desprende que:

- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, disminuye el mineral depositado al chancador.
- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, aumenta el mineral depositado en stock, puesto que la opción Stock el cambio de destino de chancador a stock.
- No existe transporte de estéril en botadero.

A partir del Gráfico 5-40 se desprende que:

- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, aumenta la cantidad de mineral depositado en stock, puesto que la opción Botadero-Stock involucra el cambio de destino de chancado a stock cuando el chancado está en ausencia de producción.
- A medida que aumenta las horas de ausencia de producción del chancador primario, aumenta la cantidad de estéril depositado en botadero, puesto que la opción Botadero-Stock involucra el cambio de postura de un equipo de carga desde un frente de mineral a un frente en estéril, cuando el chancado está en ausencia de producción.

Del análisis de Gráfico 5-41 se desprende lo siguiente:

- El movimiento total en la opción botadero es la menor de todas las opciones, puesto que involucra tiempos de cambios de posturas de frentes de carga de mineral a estéril en el momento en que el chancador falla y cambios de posturas desde frentes de carga de estéril a mineral en el momento que el chancador vuelve a producción. Sin embargo, esta opción no involucra remanejos futuros de mineral desde stock a chancado, como en las opciones stock y stock-botadero.
- Los movimientos de las opciones stock-botadero obtienen movimiento mayor a la opción botadero pero inferior a la opción stock puesto que solo involucra el cambio de postura de solo 1 equipo de carga desde frente de carga de mineral a estéril en el momento en que el chancador falla y un cambio de postura desde frente de carga de estéril a mineral en el momento que el chancador vuelve a producción.
- La opción stock es la que más mueve material de todas las opciones. Sin embargo, se debe considerar que es necesario realizar un remanejo futuro desde el mineral depositado en stock hacia el chancado.

5.8.2 Inhabilitación de equipo de carga

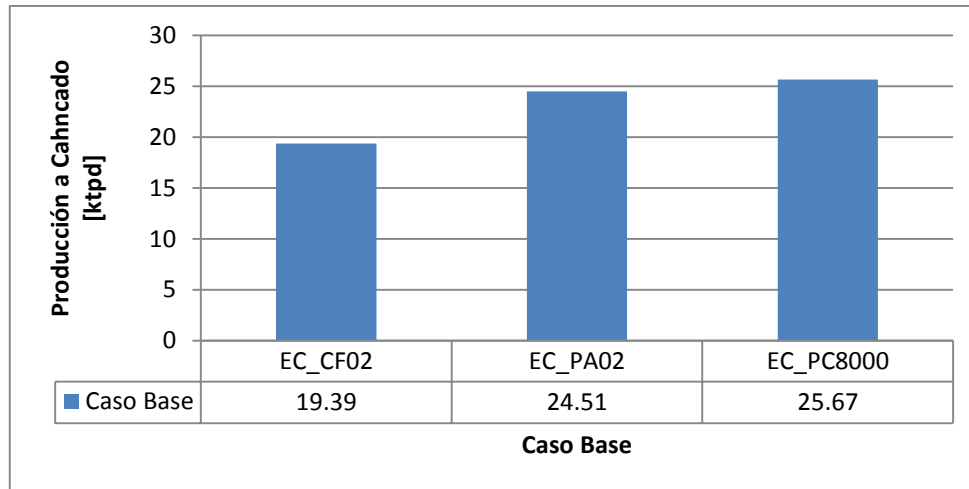


Gráfico 5-42: Caso base

El movimiento total del caso base es de 69.57 [ktpd].

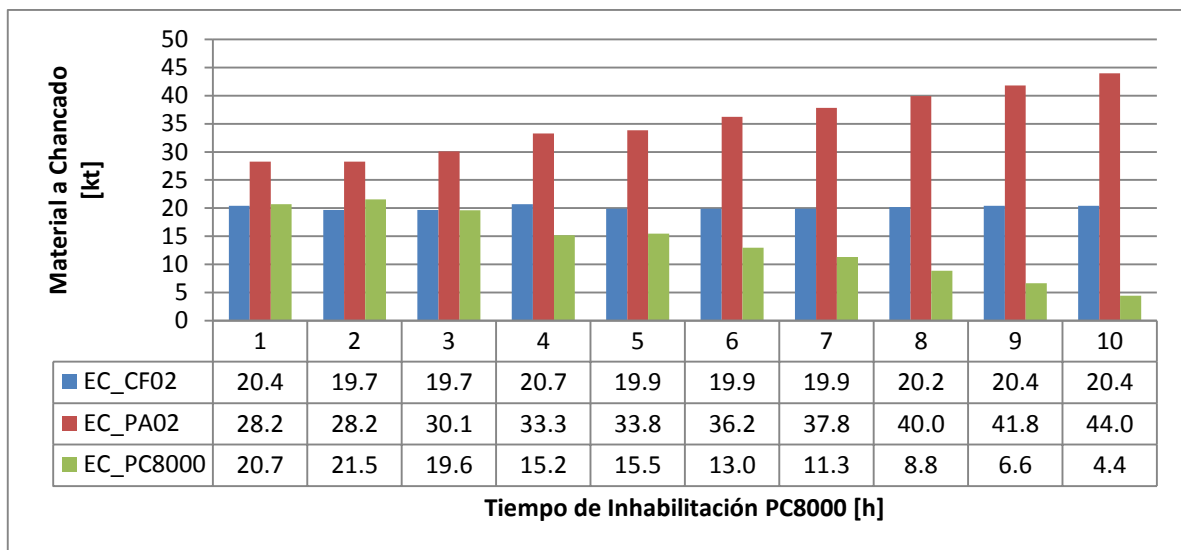


Gráfico 5-43: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación PC8000

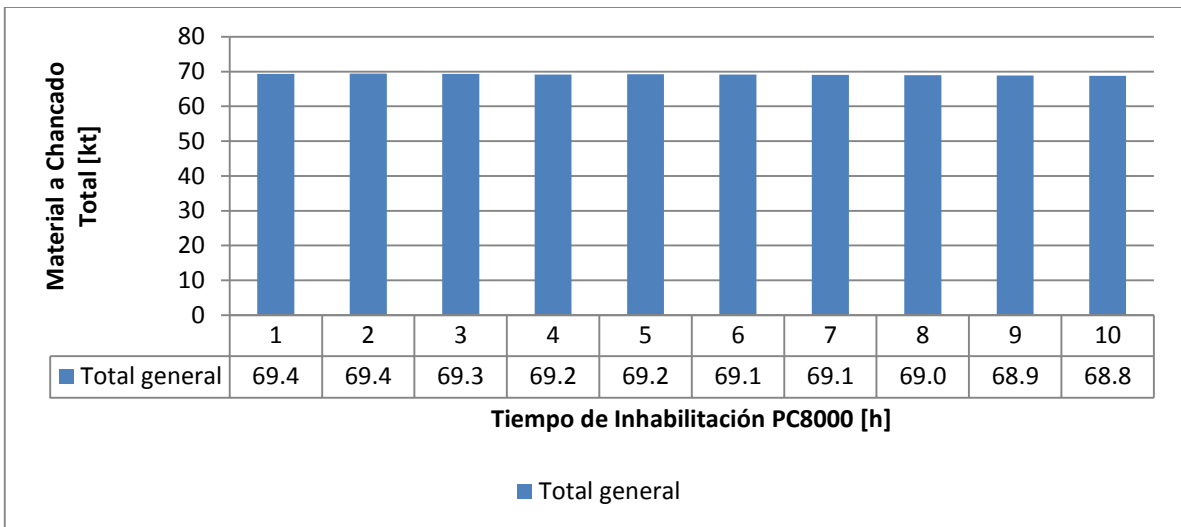


Gráfico 5-44: Producción total a chancado bajo escenario inhabilitación PC8000

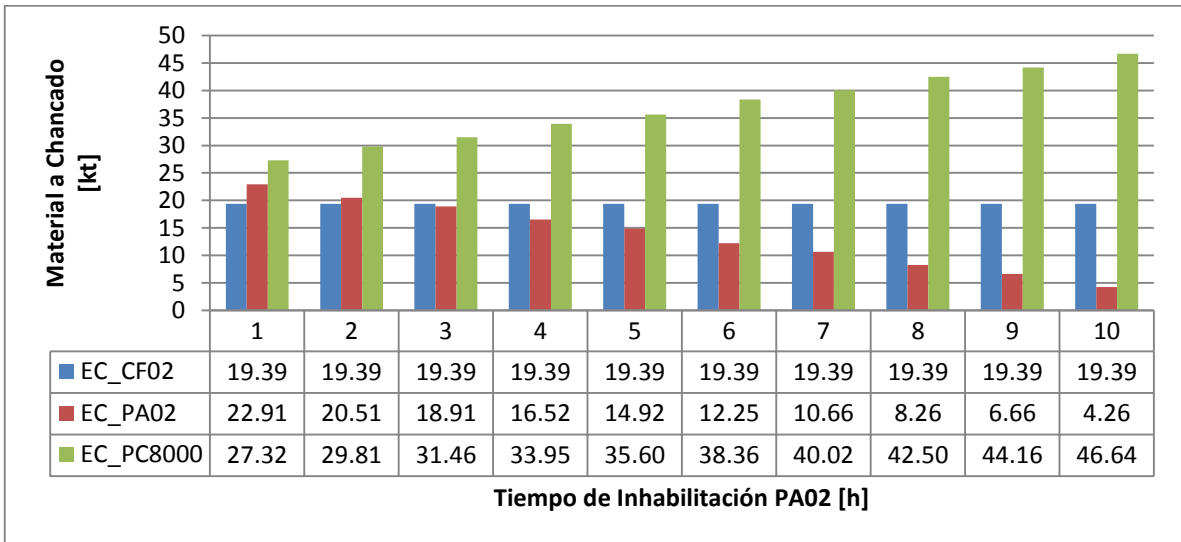


Gráfico 5-45: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación PA02

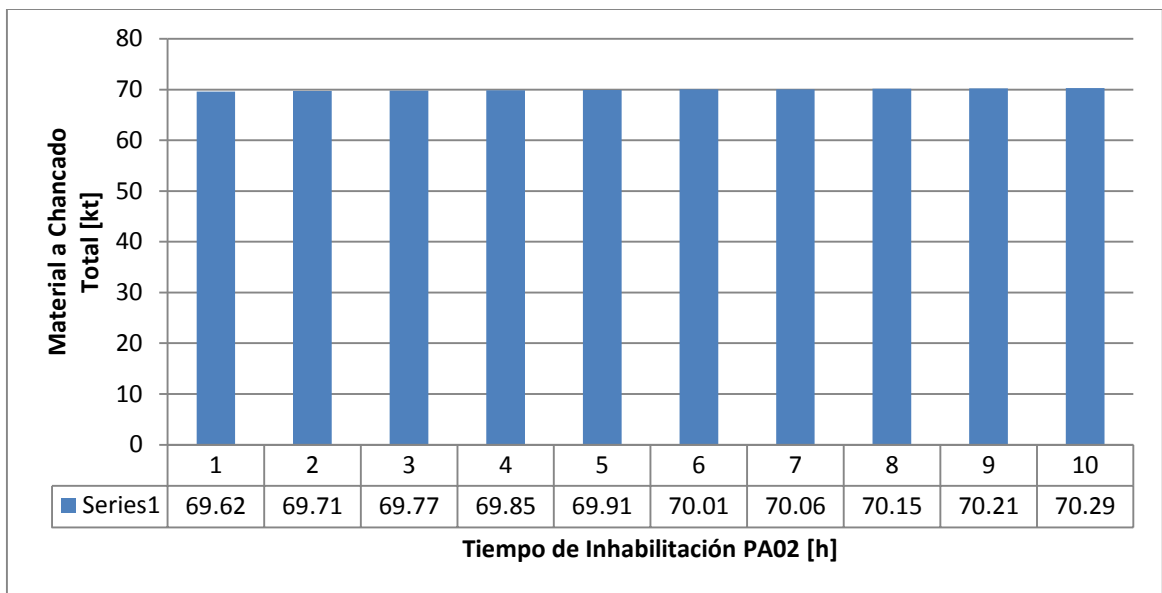


Gráfico 5-46: Producción total a chancado bajo escenario inhabilitación PA02

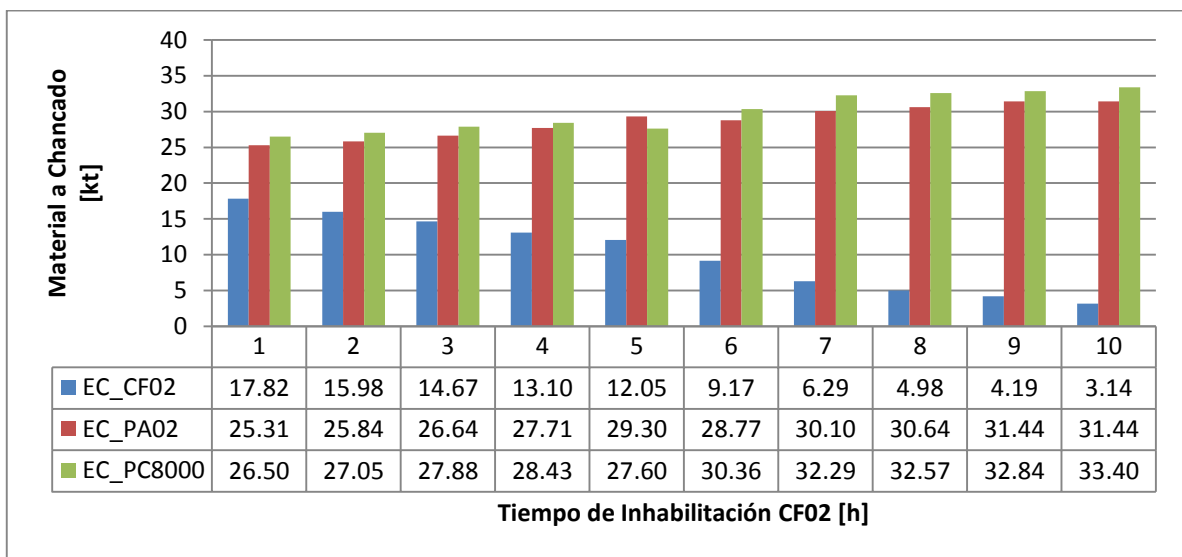


Gráfico 5-47: Producción por equipo de carga bajo escenario inhabilitación CF02

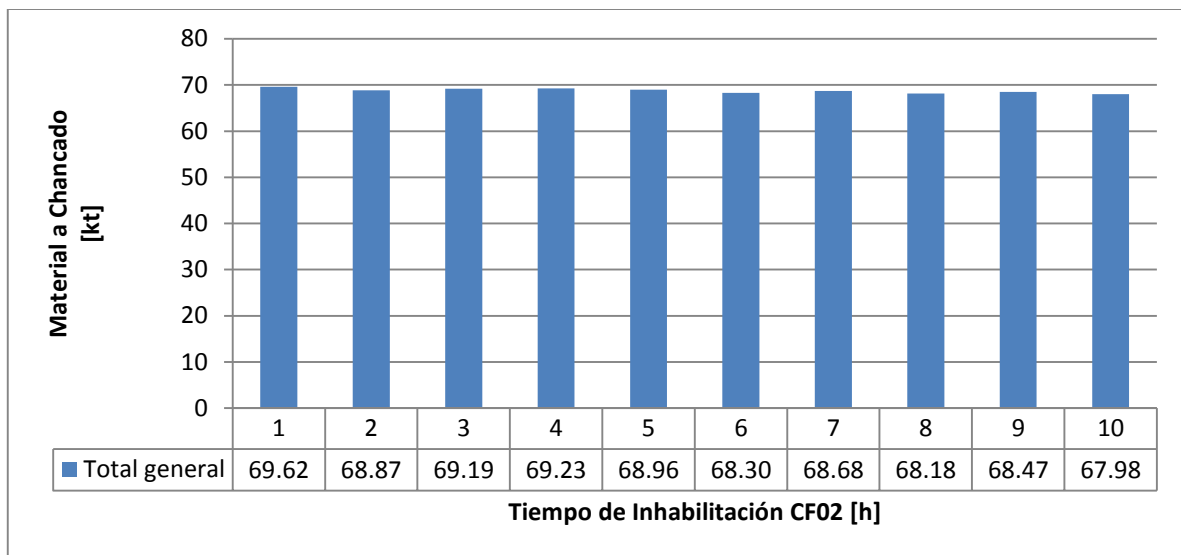


Gráfico 5-48: Producción total a chancado bajo escenario de inhabilitación CF02

A partir del análisis del Gráfico 5-43, se desprende lo siguiente:

- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PC8000 disminuye conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PC8000, como era esperado.
- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_CF02 no varía al aumentar la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PC8000, ya que la cantidad de camiones asignados a EC_CF02 no cambia.
- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PA02 aumenta conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PC8000, puesto que los camiones asociados al EC_PC8000 se reasignan al EC_PA02.

A partir del análisis del Gráfico 5-45, se desprende lo siguiente:

- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PA02 disminuye conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PA02, como era esperado.
- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_CF02 no varía al aumentar la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PA02, ya que la cantidad de camiones asignados a EC_CF02 no cambia.
- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PC8000 aumenta conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_PA02, puesto que los camiones asociados al EC_PA02 se reasignan al EC_PC8000.

A partir del análisis del Gráfico 5-47, se desprende lo siguiente:

- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_CF02 disminuye conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_CF02, como era esperado.

- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PC8000 aumenta conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_CF02, puesto que la mitad de los camiones asociados al EC_CF02 se reasignan al EC_PC8000.
- El movimiento de mineral a chancado cargado por el EC_PA02 aumenta conforme aumenta la cantidad de horas de ausencia de producción de EC_CF02, puesto que la mitad de los camiones asociados al EC_CF02 se reasignan al EC_PA02.

El movimiento total de material a chancado en el caso base, es decir, sin ausencia de operación de equipos de carga es de 69.57 [ktpd], como se desprende del Gráfico 5-42.

Los gráficos Gráfico 5-44, Gráfico 5-46 y Gráfico 5-48, los cuales cuantifican el movimiento de material de la ausencia de producción de los equipos de carga EC_PC8000, EC_PA02 y EC_CF02 respectivamente obtienen producciones prácticamente similares al caso base. Se concluye que la incidencia de ausencia de producción de los equipos de carga no afecta la productividad del sistema en términos de cantidad de material transportado al chancador, sin embargo, la mezcla de material transportado a chancado cambia, lo que podría incidir aguas abajo en los desempeños del procesamiento de minerales, si es que el proceso aguas abajo es sensible a la ley media de cobre total o soluble o bien a algún contaminante como el arsénico.

6 CASOS DE ESTUDIO INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA

6.1 Descripción del caso de estudio

El presente caso de estudio tiene por objetivo evaluar la incertidumbre geológica de un plan minero a corto plazo en una faena minera real a cielo abierto. A partir del modelo de bloques por kriging y simulaciones condicionales, se evalúan las características geológicas de los polígonos de corto plazo.

Se entiende por características geológicas de un polígono determinado las siguientes:

- Ley de cobre total.
- Ley de cobre soluble.
- Solubilidad.

El uso de estimación por kriging permite una evaluación determinística de las características geológicas de los polígonos de extracción, como lo ilustra la Figura 6-1.

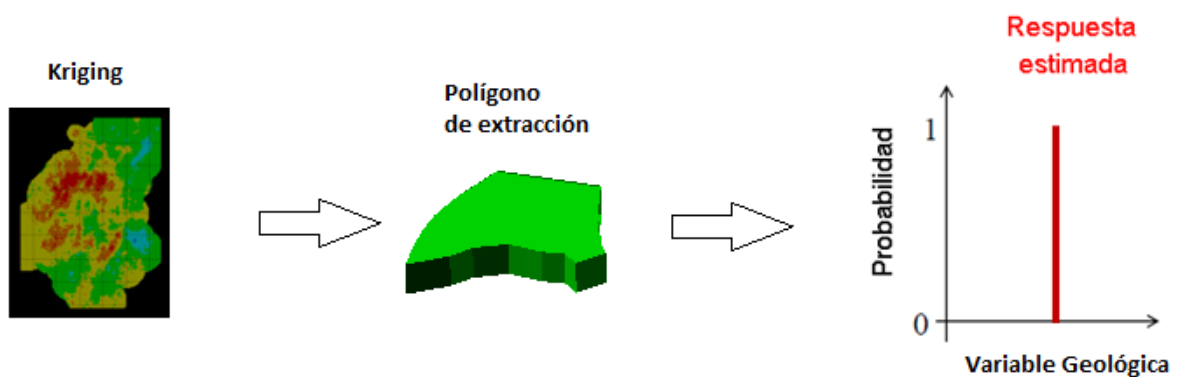


Figura 6-1: Esquema evaluación geológica determinista polígono de extracción

Por otra parte, el uso de simulaciones condicionales permite una evaluación estocástica de las características geológicas de los polígonos de extracción, como lo muestra la Figura 6-2.

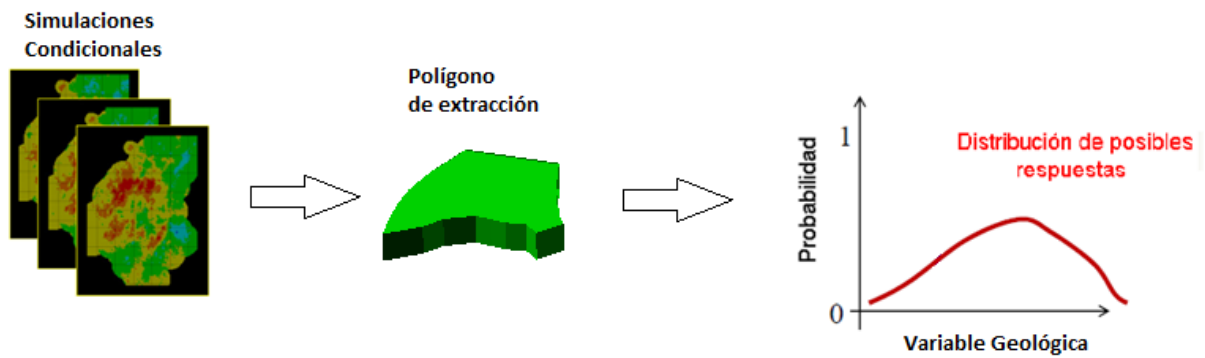


Figura 6-2: Esquema evaluación geológica estocástica polígono de extracción

Según el plan semanal real base, los polígonos de extracción de mineral son los que se muestran en la Figura 6-3.

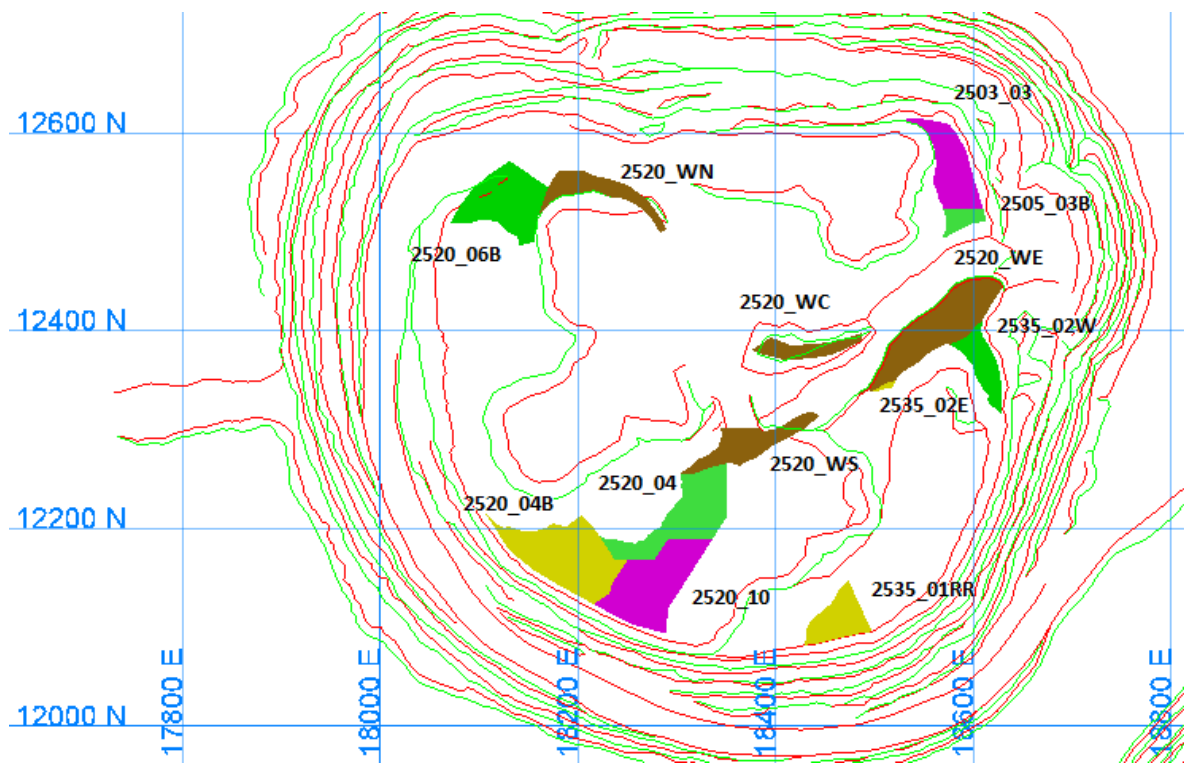


Figura 6-3: Polígonos de corto plazo. Vista en planta

En la Tabla 6-1 se reportan las estadísticas básicas de estos polígonos.

Polígono	Área Total [m ²]	Volumen Total [m ³]	Masa Total [kt]
2505_03	764	11,455	29,268
2505_03B	3,284	49,265	125,871
2520_04	4,879	73,178	186,970
2520_04B	6,104	91,564	233,946

2520_06B	4,449	66,737	170,513
2520_10	5,501	82,510	210,814
2535_01RR	2,235	33,532	85,675
2535_02E	1,840	27,603	70,524
2535_02W	94	1,409	3,601

Tabla 6-1: Caracterización de polígonos por volumen, área y masa.

6.2 Experimentos asociados a la incertidumbre geológica

Los siguientes experimentos se realizan dentro del contexto del caso de estudio asociado a la incertidumbre geológica:

- Comparación de las características geológicas de polígonos de extracción mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales.
- Evaluación de la incertidumbre geológica de polígonos de extracción.
- Evaluación de la incertidumbre geológica asociada al plan de corto plazo.

6.2.1 Comparación de las características geológicas de polígonos de extracción mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales

Este experimento tiene por objetivo validar los procedimientos de estimación por kriging y las simulaciones condicionales.

Para ello se comparan las características geológicas de los polígonos de extracción in situ por medio de kriging y el promedio de simulaciones condicionales.

6.2.2 Comparación de las características geológicas sobre el plan base mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales

Este experimento tiene por objetivo validar los procedimientos de estimación por kriging y las simulaciones condicionales.

Para ello se comparan las características geológicas (ley de cobre total y ley de cobre soluble) a lo largo de todos los periodos del plan base calculadas por medio de kriging y el promedio de simulaciones condicionales.

6.2.3 Evaluación de la incertidumbre geológica de polígonos de extracción

El objetivo de este experimento es evaluar la variabilidad de la incertidumbre geológica que existe en cada polígono de extracción. Para ello, a partir de las 1000 réplicas del modelo de bloques simulado, se procede a cuantificar la incertidumbre de cada una de sus características geológicas por medio de las siguientes estadísticas:

- Mínimo.
- Media.
- Máximo.
- Varianza.
- Desviación estándar.
- Intervalos de confianza a un nivel de confiabilidad de 50%.
- Intervalos de confianza a un nivel de confiabilidad de 95%.
- Histogramas de la ley de cobre total, ley de cobre soluble y la solubilidad para cada polígono de extracción.

También se investiga si existe una relación entre la media y la variabilidad de la característica geológica estudiada. Este análisis excluirá a todos los polígonos de extracción menores a 50 [kt] de forma de eliminar el efecto del soporte espacial en la incertidumbre de la característica geológica en estudio.

6.2.4 Evaluación de la incertidumbre geológica asociado al plan de corto plazo

El objetivo de este experimento es evaluar el comportamiento de la ley media de alimentación de cobre total y cobre soluble a chancador primario. La metodología en detalle es la siguiente:

1. A partir del caso base se generan 1000 réplicas de simulaciones operacionales.
2. En cada una de las réplicas se cuantifica la cantidad de material extraído por polígono de extracción, por destino y por período.
3. Para cada polígono de extracción, se calcula el movimiento promedio por período sobre las 1000 réplicas.
4. A continuación, se combina la información del movimiento de material promedio por período y la evaluación de incertidumbre geológica por polígono de extracción para cuantificar la incertidumbre de las variables geológicas del promedio de movimiento de material a chancador.

La metodología se explica esquemáticamente en la Figura 6-4.

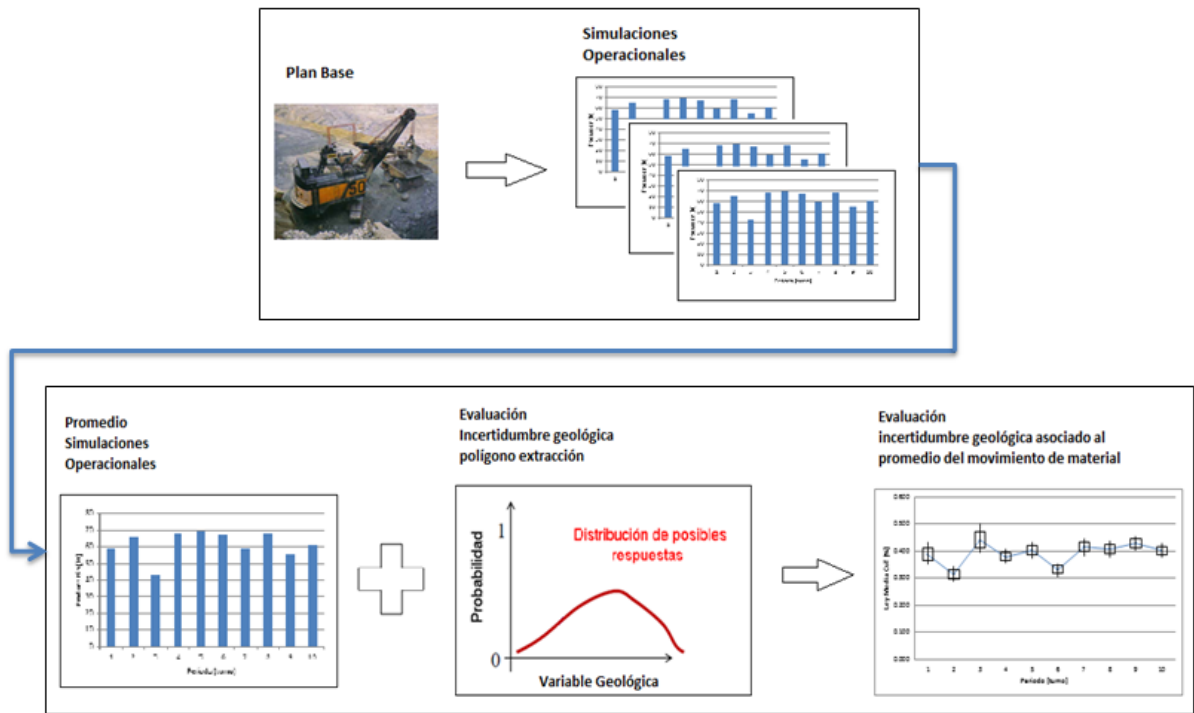


Figura 6-4: Esquema evaluación movimiento material estocástica y generación de movimiento de material promedio

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA

7.1 Comparación de características geológicas de polígonos de extracción mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales

Polígono	Ley Media CuT {KG} [%]	Ley Media CuT {Prom_Sim} [%]	Ley Media CuS {KG} [%]	Ley Media CuS {Prom_Sim} [%]	Solubilidad* {KG} [%]	Solubilidad {Prom_Sim} [%]
2505_03	0.401	0.402	0.29	0.311	73.32	77.36
2505_03B	0.455	0.455	0.29	0.302	64.62	66.42
2520_04	0.320	0.318	0.23	0.240	72.81	75.66
2520_04B	0.237	0.231	0.11	0.121	47.26	52.54
2520_06B	0.572	0.566	0.42	0.414	73.43	73.12
2520_10	0.234	0.230	0.14	0.142	60.26	61.94
2535_01RR	0.550	0.515	0.45	0.423	82.18	82.10
2535_02E	0.231	0.225	0.12	0.129	52.38	57.26
2535_02W	0.239	0.225	0.15	0.146	61.51	64.92

Tabla 7-1: Caracterización de polígonos por leyes de cobre total, leyes de cobre soluble y solubilidad obtenidas por kriging y promedio de simulaciones

En la Tabla 7-1, la estimación de la solubilidad mediante kriging se obtiene dividiendo la ley media de cobre soluble por la ley media de cobre total. Teóricamente esta forma de estimación de la solubilidad no es correcta debido a que se están dividiendo valores de estimaciones, lo que introduce sesgo en la solubilidad así estimada.

A continuación se comparan gráficamente las características geológicas de los polígonos de extracción entre la estimación por kriging y el promedio de las simulaciones.

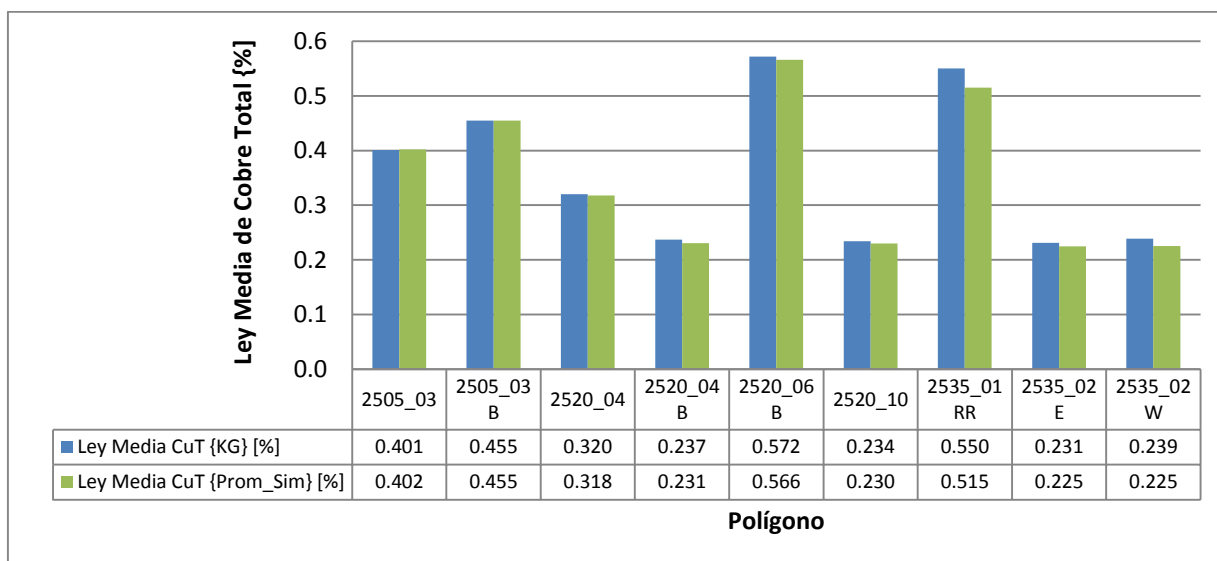


Gráfico 7-1: Comparación de CuT para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones

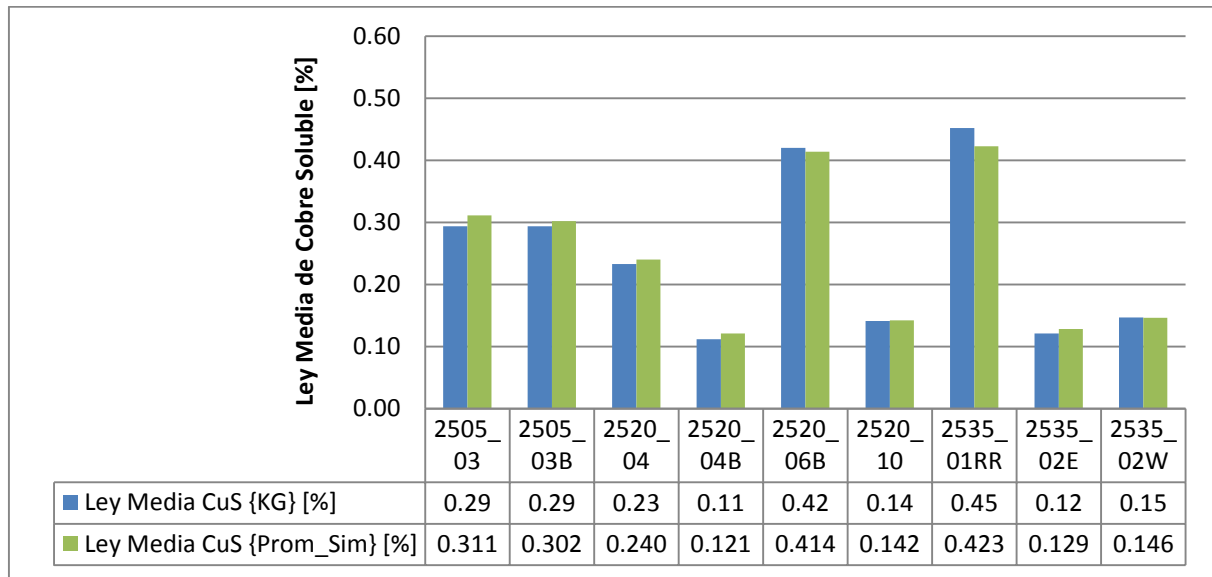


Gráfico 7-2: Comparación de CuS para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones

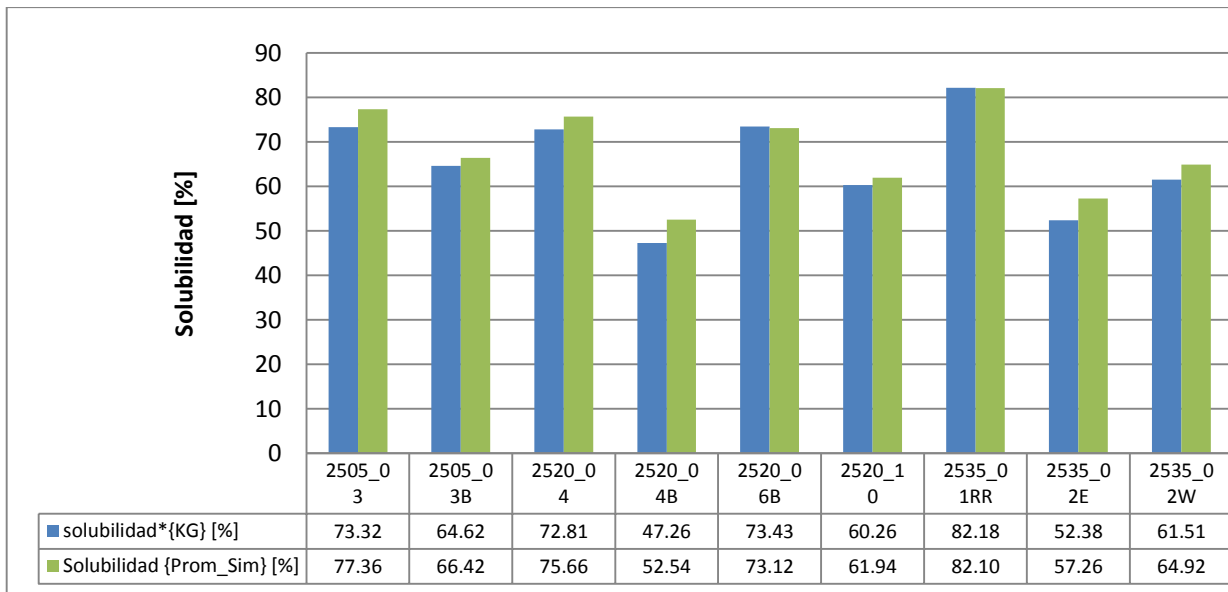


Gráfico 7-3: Comparación de sol para polígonos entre kriging y el promedio de simulaciones

Se observa que las características geológicas de los polígonos de extracción estimadas por medio de kriging y el promedio de simulaciones son similares, lo que valida los procesos de estimación por kriging y de las simulaciones condicionales.

7.2 Comparación de características geológicas sobre el plan base mediante kriging y promedio de simulaciones condicionales

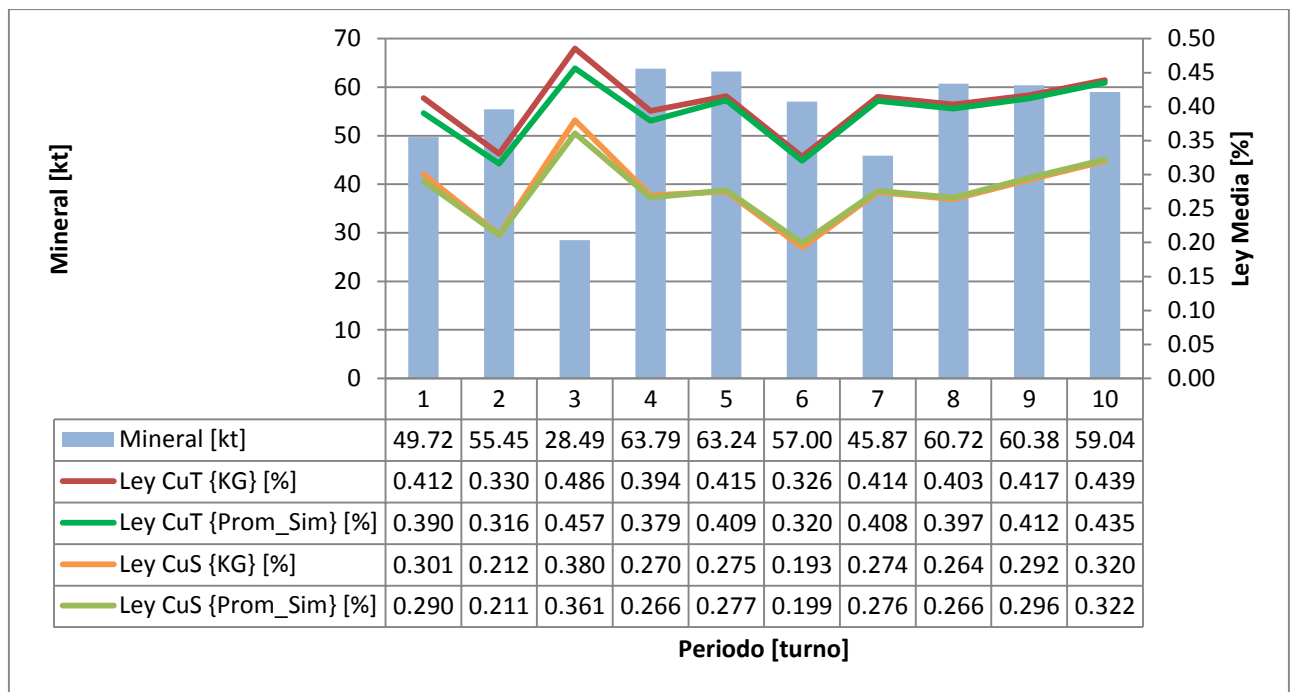


Gráfico 7-4: Plan base de movimiento de mineral. Comparación de ley de cobre total y soluble entre kriging y promedio de simulaciones

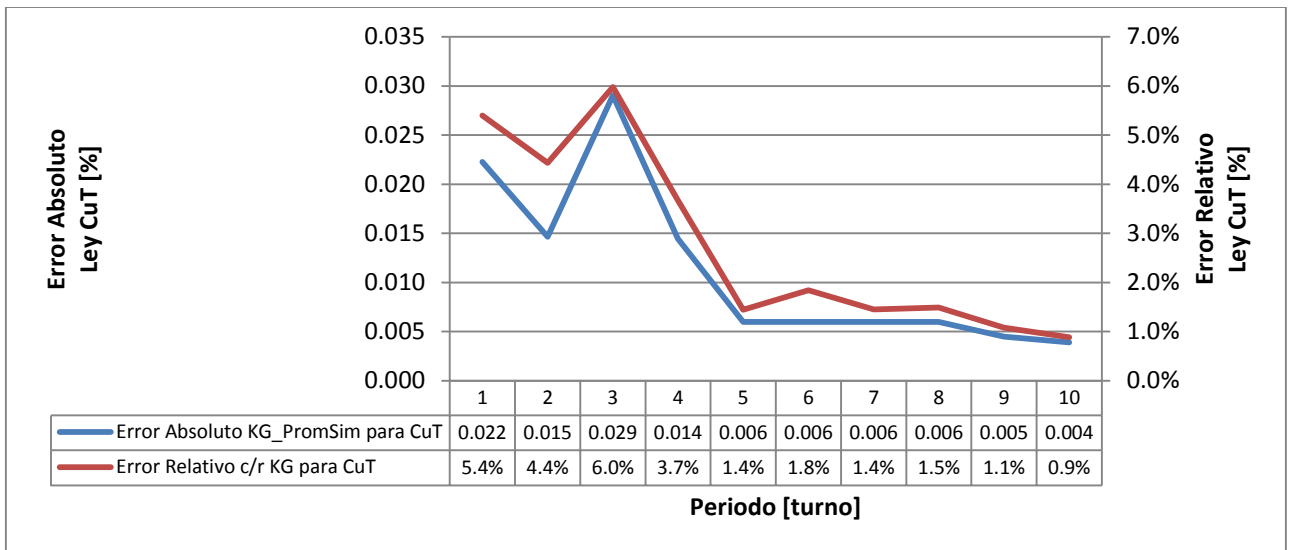


Gráfico 7-5: Error Absoluto y Relativo de Ley de Cobre Total entre kriging y promedio de simulaciones

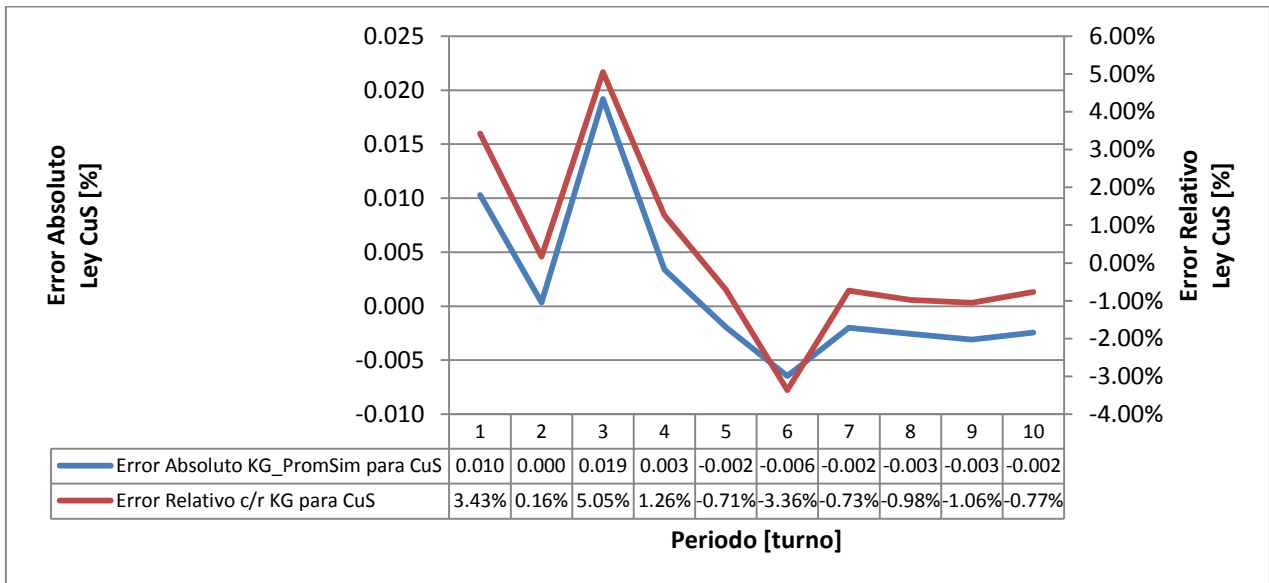


Gráfico 7-6: Error Absoluto y Relativo de Ley de Cobre Soluble entre kriging y promedio de simulaciones

Se observa que las características geológicas de los polígonos de extracción estimadas por medio de kriging y el promedio de simulaciones son similares, lo que valida los procesos de estimación por kriging y de las simulaciones condicionales.

Tipo de Error	Cobre Total	Cobre Soluble
---------------	-------------	---------------

Máximo Error Absoluto	0.029	0.019
Promedio Error Absoluto	0.011	0.001
Máximo Error Relativo	6.00%	5.05%
Promedio Error Relativo	2.80%	0.20%

Tabla 7-2: Comparación de errores absolutos y relativos (máximos y promedios) para cobre total y cobre soluble calculados a por medio de kriging y simulaciones condicionales

7.3 Evaluación de la incertidumbre geológica de polígonos de extracción

Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

7.3.1 Ley de cobre total

Polígono	Mínimo	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar
2505_03	0.337	0.402	0.487	0.0005	0.0225
2505_03B	0.412	0.455	0.504	0.0002	0.0157
2520_04	0.289	0.318	0.354	0.0001	0.0098
2520_04B	0.207	0.231	0.261	0.0001	0.0078
2520_06B	0.523	0.566	0.615	0.0002	0.0156
2520_10	0.207	0.230	0.253	0.0001	0.0074
2535_01RR	0.459	0.515	0.593	0.0004	0.0205
2535_02E	0.188	0.225	0.262	0.0001	0.0115
2535_02W	0.165	0.225	0.310	0.0005	0.0219

Tabla 7-3: Estadísticas Básicas sobre Ley de Cobre Total para polígonos

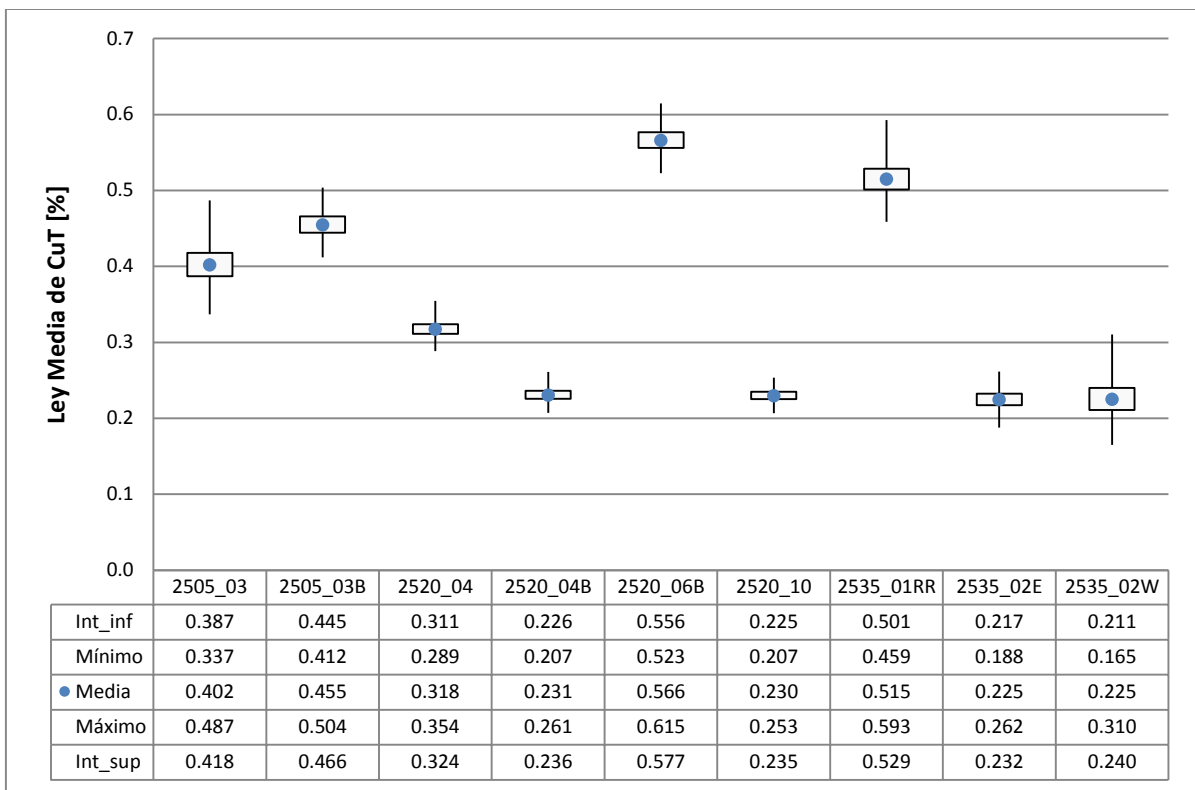


Gráfico 7-7: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de la ley de cobre total sobre polígonos

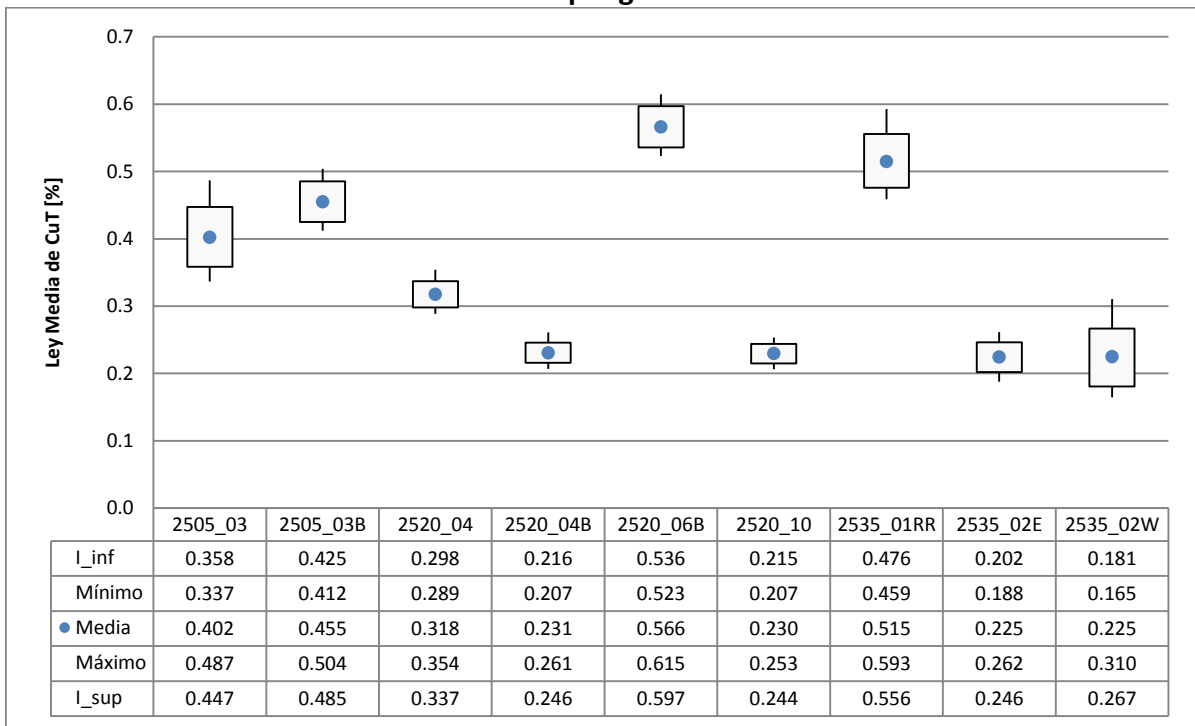


Gráfico 7-8: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre total sobre polígonos

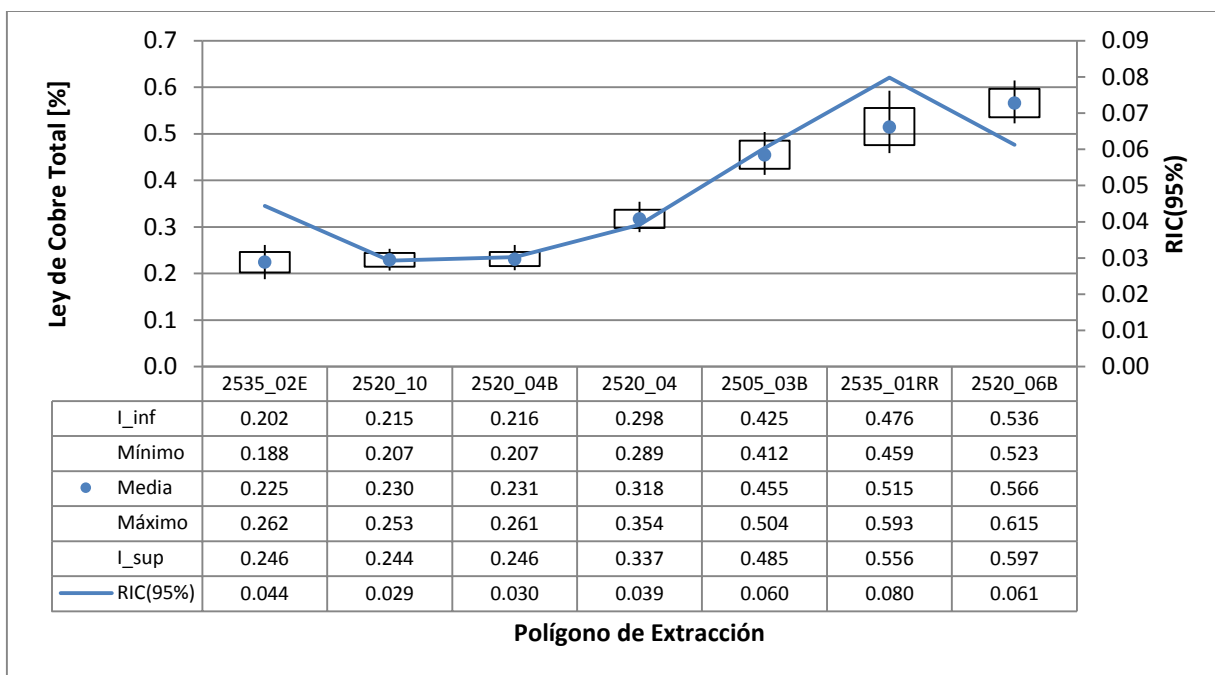


Gráfico 7-9: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre total sobre polígonos ordenados por ley de creciente

7.3.2 Ley de cobre soluble

Polígono	Mínimo	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar
2505_03	0.255	0.311	0.382	0.0004	0.0201
2505_03B	0.262	0.302	0.348	0.0002	0.0138
2520_04	0.216	0.240	0.273	0.0001	0.0086
2520_04B	0.104	0.121	0.139	0.0000	0.0057
2520_06B	0.368	0.414	0.465	0.0002	0.0139
2520_10	0.124	0.142	0.161	0.0000	0.0058
2535_01RR	0.369	0.423	0.487	0.0003	0.0187
2535_02E	0.095	0.129	0.154	0.0001	0.0089
2535_02W	0.102	0.146	0.217	0.0003	0.0176

Tabla 7-4: Estadísticas Básicas sobre Ley de Cobre Total para polígonos

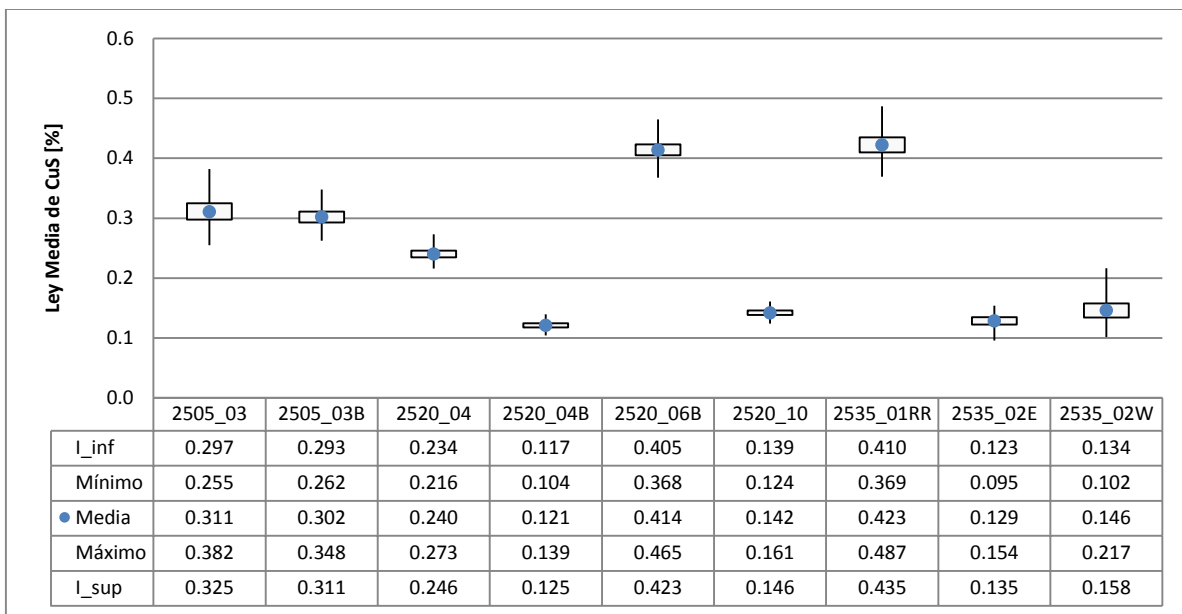


Gráfico 7-10: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos

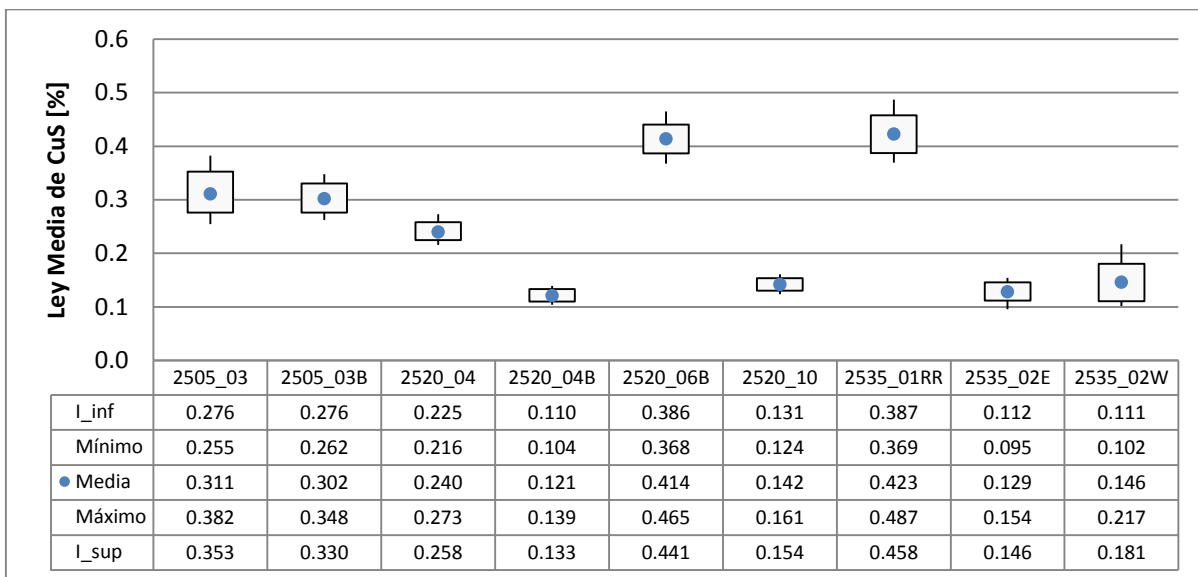


Gráfico 7-11: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos

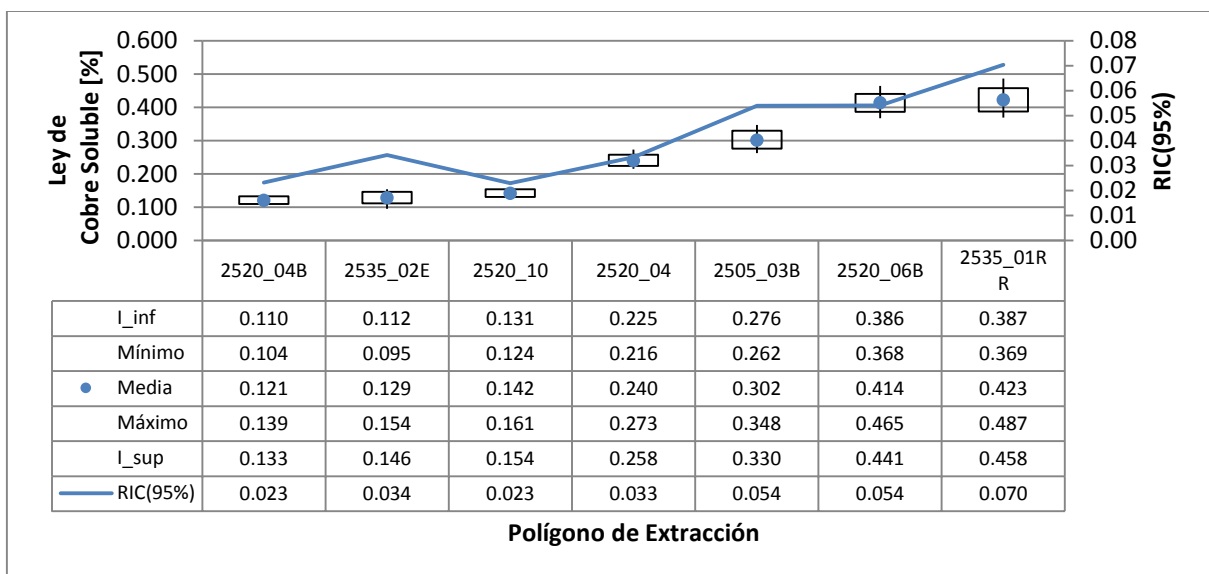


Gráfico 7-12: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de la ley de cobre soluble sobre polígonos ordenados por ley creciente

7.3.3 Solubilidad

Polígono	Mínimo	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar
2505_03	71.68	77.32	81.69	2.589	1.609
2505_03B	61.47	66.40	71.40	2.103	1.450
2520_04	72.83	75.66	78.26	0.739	0.859
2520_04B	47.70	52.49	57.16	1.975	1.405
2520_06B	69.20	73.12	76.76	0.972	0.986
2520_10	57.49	61.92	65.30	1.415	1.189
2535_01RR	79.19	82.10	84.65	0.785	0.886
2535_02E	48.77	57.24	63.00	4.179	2.044
2535_02W	53.52	64.86	72.17	10.241	3.200

Tabla 7-5: Estadísticas Básicas sobre Solubilidad para polígonos

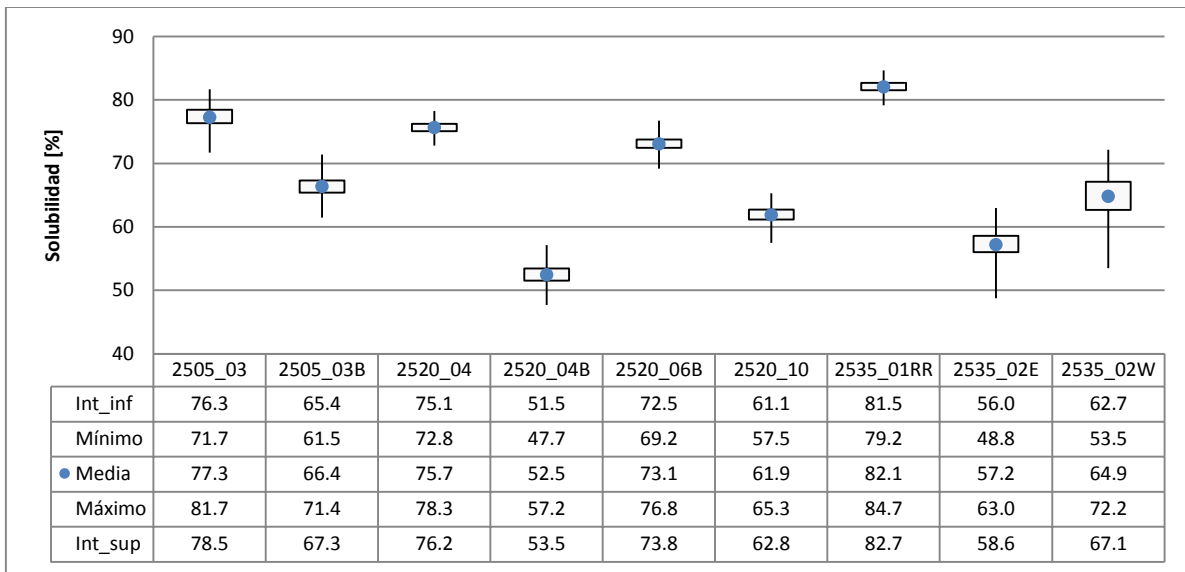


Gráfico 7-13: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 50%, de solubilidad sobre polígonos

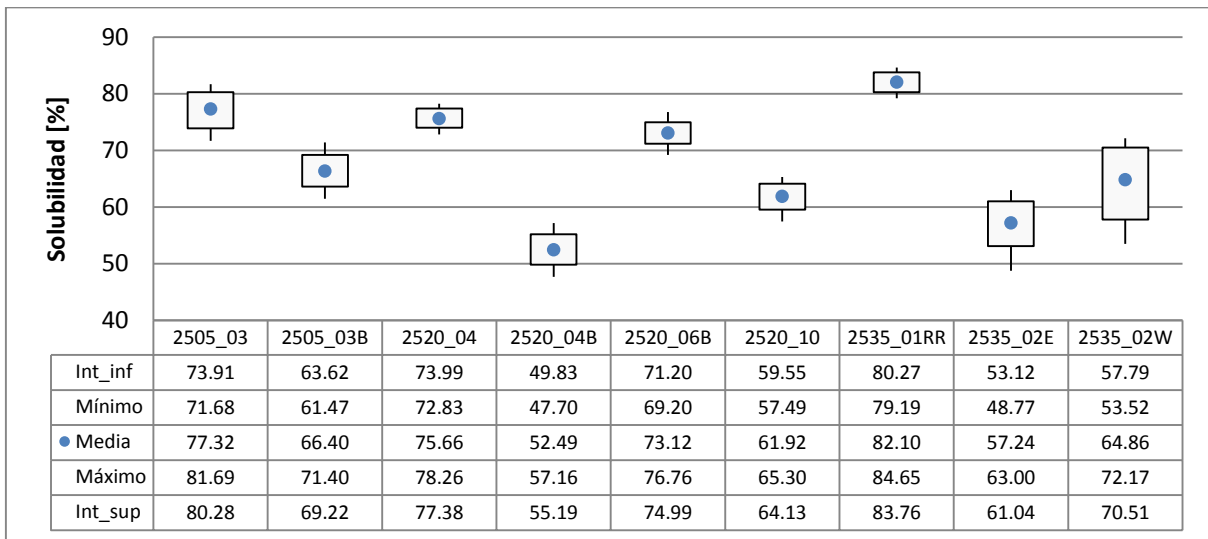


Gráfico 7-14: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de solubilidad sobre polígonos

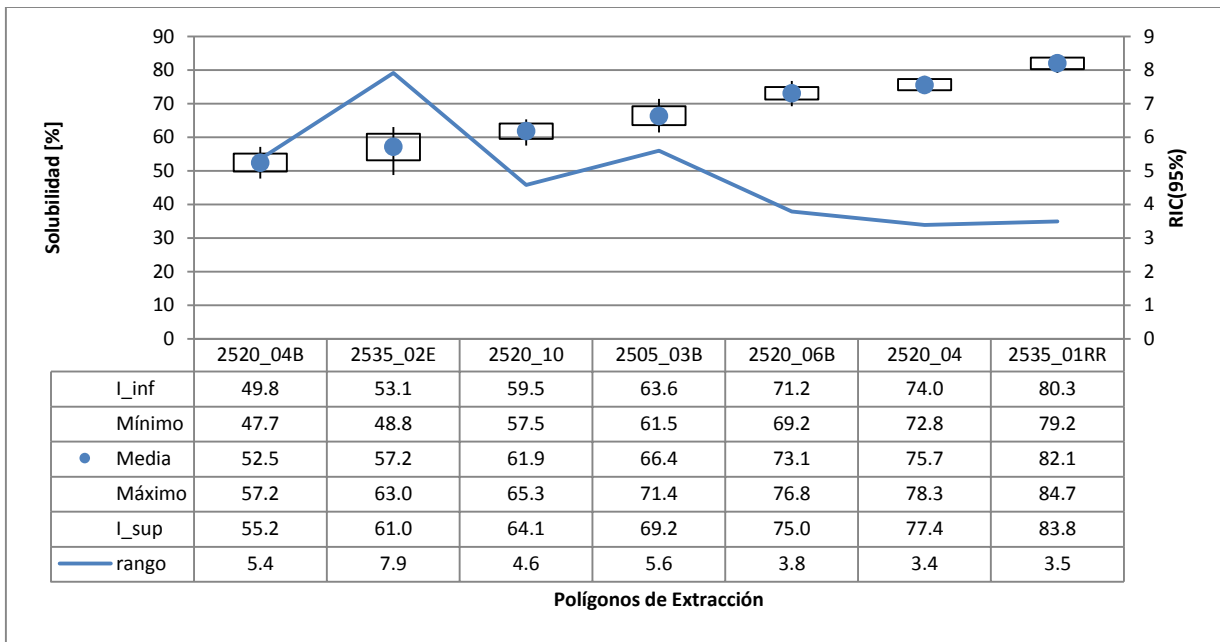


Gráfico 7-15: Intervalos de confianza, a una confiabilidad de 95%, de solubilidad sobre polígonos ordenados por solubilidad creciente

- El máximo RIC(95%) para la ley de cobre total asociado a los polígonos de extracción es de 0.089%, mientras que el promedio es de 0.058%.
- El máximo RIC(95%) para la ley de cobre soluble asociado a los polígonos de extracción es de 0.077%, mientras que el promedio es de 0.049%.
- El máximo RIC(95%) para la solubilidad asociado a los polígonos de extracción es de 12.72%, mientras que el promedio es de 5.91%.
- Al graficar los polígonos de extracción con ley de cobre total y soluble creciente se aprecia un incremento del RIC(95%). Esto quiere decir que para polígonos con ley de cobre total y soluble alta la variabilidad es mayor en comparación a los polígonos de extracción con una ley de cobre total y soluble menor.
- Al graficar los polígonos de extracción con solubilidad creciente se aprecia una disminución del RIC(95%). Esto quiere decir que para polígonos con solubilidad alta la variabilidad es menor en comparación a los polígonos de extracción con una solubilidad mayor.

7.4 Evaluación de la incertidumbre geológica asociada al plan de corto plazo

Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

7.4.1 Ley media de cobre total a chancador

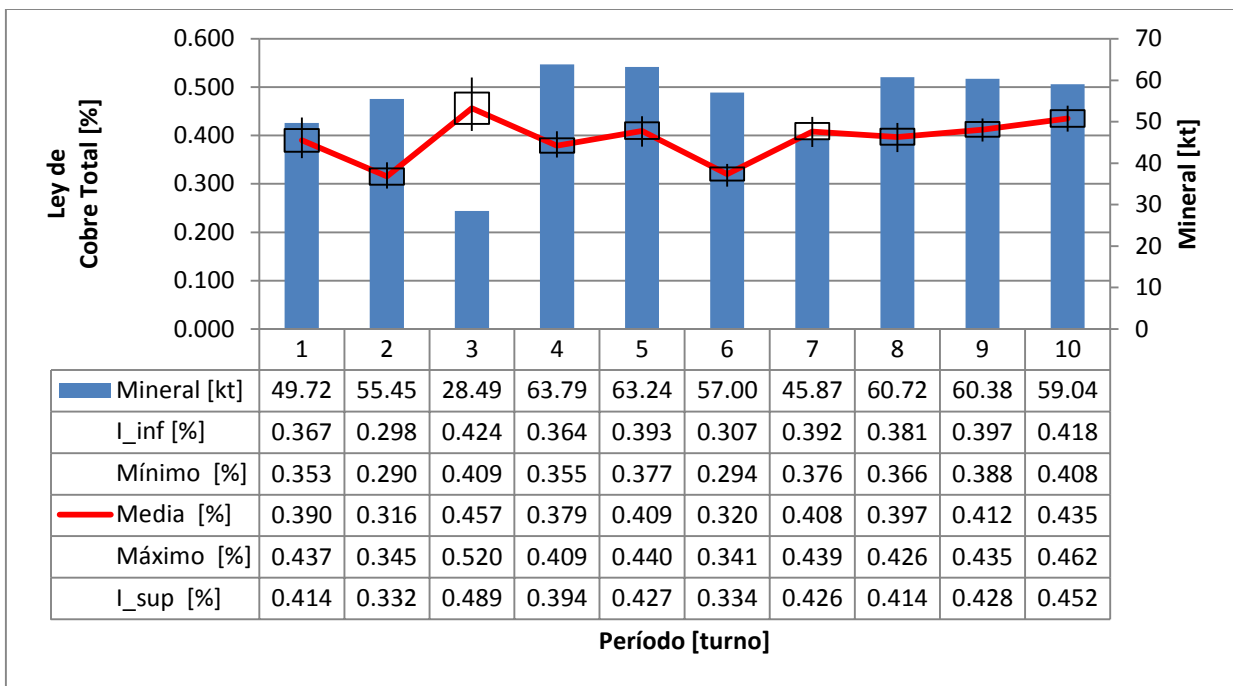


Gráfico 7-16: Ley Media CuT vs Período. Confiabilidad 95%

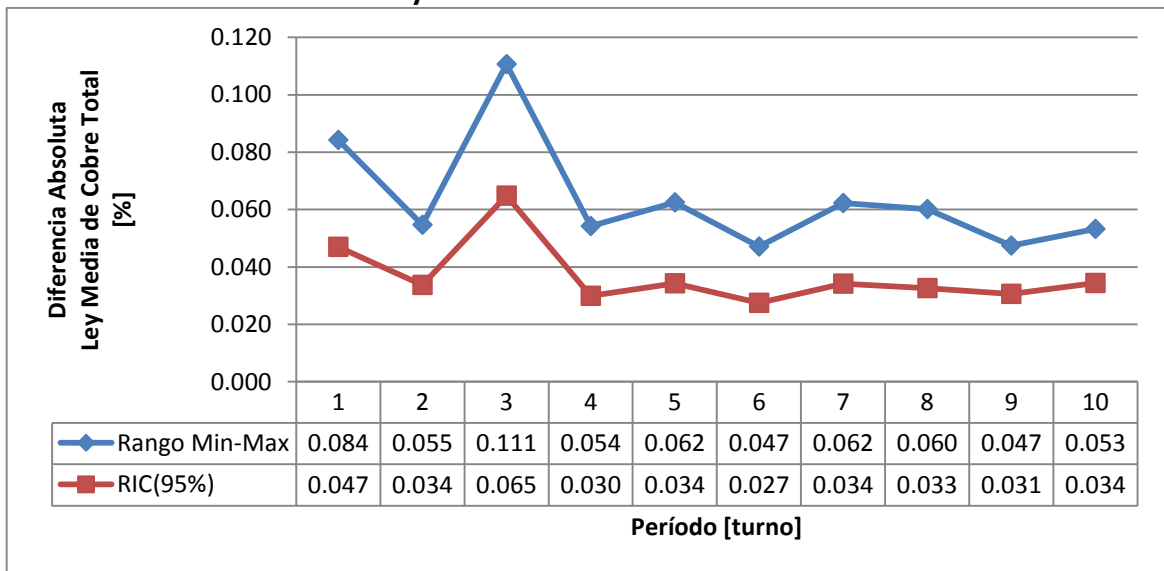


Gráfico 7-17: Rango Ley CuT vs Período. Confiabilidad 95%

El máximo RIC(95%) para la ley de cobre total es igual a 0.060% para todos los períodos del plan considerado.

7.4.2 Ley media de cobre soluble a chancador

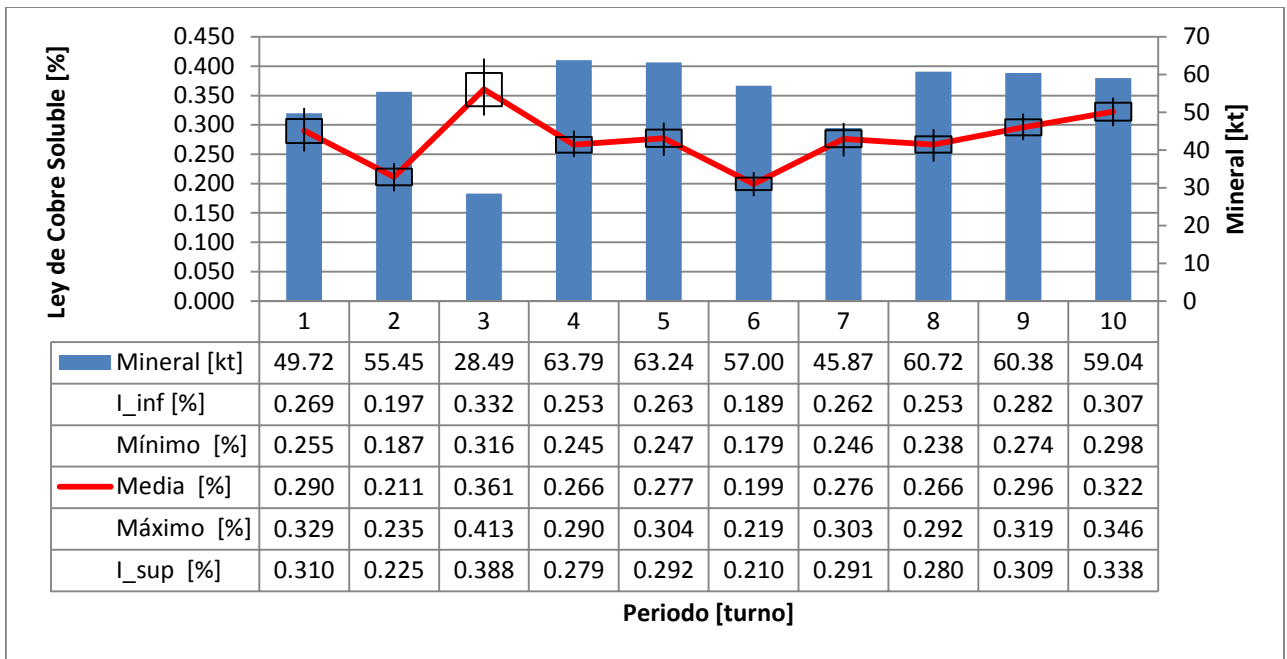


Gráfico 7-18: Ley Media de CuS vs Período. Confiabilidad 95%

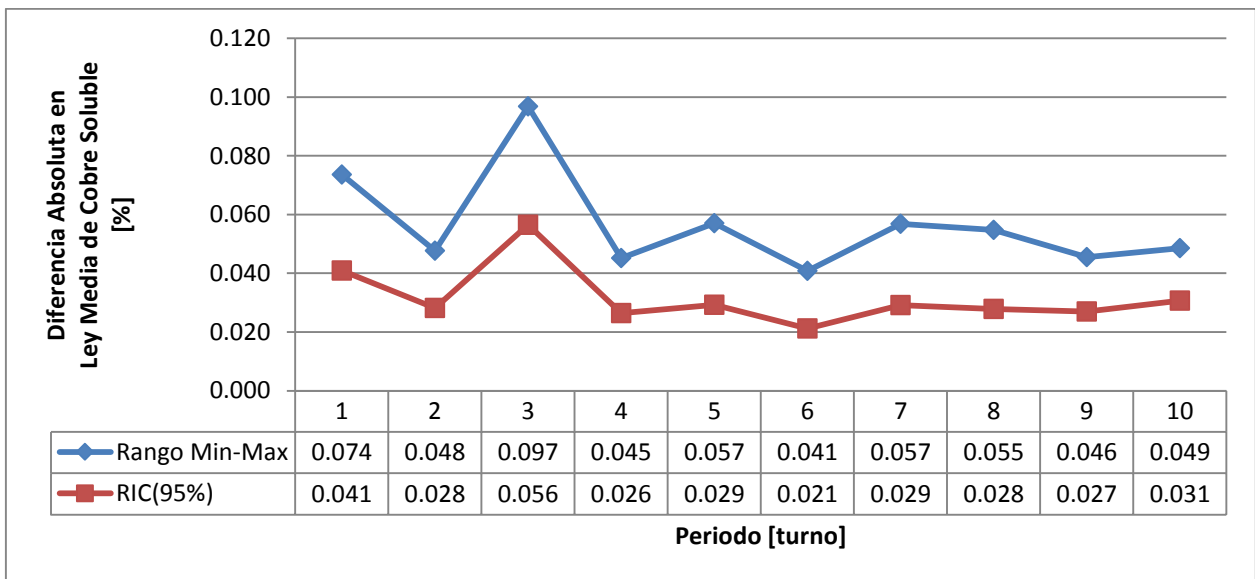


Gráfico 7-19: Rango Ley Media de CuS vs Período. Confiabilidad 95%

El máximo RIC(95%) para la ley de cobre total es igual a 0.065%, mientras que el promedio es de 0.037% para todos los períodos del plan considerado.

El máximo RIC(95%) para la ley de cobre soluble es igual a 0.056%, mientras que el promedio es de 0.032% para todos los períodos del plan considerado.

8 EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA Y OPERACIONAL

El objetivo de este experimento es comparar el impacto de las incertidumbres geológica y operacional (en forma independiente), en los finos de cobre recuperados. La comparación se realiza en términos de media y del intervalo de confianza a una confiabilidad de 95%.

La metodología para el caso de la incertidumbre operacional es la siguiente:

Evaluar la media, intervalo superior e intervalo inferior de los finos de cobre in situ, multiplicando la ley media de cobre de alimentación hacia chancador por la media, intervalo superior e intervalo inferior del mineral alimentado hacia chancado, respectivamente.

La metodología para el caso de la incertidumbre geológica es la siguiente:

Evaluar la media, intervalo superior e intervalo inferior de los finos de cobre in situ multiplicando la media de mineral alimentado hacia chancador por la media, intervalo superior e intervalo inferior de la ley media de cobre alimentado hacia chancado, respectivamente.

La simbología usada es la siguiente:

- I_{inf} : Límite inferior del intervalo de confianza a confiabilidad de 95%
- I_{sup} : Límite superior del intervalo de confianza a confiabilidad de 95%
- $RIC(95\%)$: $I_{sup}-I_{inf}$. Rango de intervalo de confianza a una confiabilidad de 95%.

Los tipos de incertidumbre a comparar y sus consideraciones en detalle son los siguientes:

- Incertidumbre Geológica (IG): A secuencia de minado de polígonos fijo, se considera la incertidumbre del cobre total y cobre soluble en los polígonos de extracción. Considera movimiento de material fijo y leyes variables.
- Incertidumbre Operacional Mantenciones (IOM): A secuencia de minado de polígonos fijo, se considera la incertidumbre del movimiento de material debido a los parámetros operacionales y al modelo de no operación de equipos de carga fija (interpretado como mantenciones). Considera movimiento de material variable y leyes fijas.
- Incertidumbre Operacional Fallas (IOF): A secuencia de minado de polígonos fijo, se considera la incertidumbre del movimiento de material debido a los parámetros operacionales y al modelo de no operación de

equipos de carga variable (interpretada como fallas). Considera movimiento de material variable y leyes fijas.

8.1.1 Comparación de finos de cobre total in situ

Estadística	Geológica	Operacional Mantenciones	Operacional Fallas
I_inf	2,022	1,749	1,620
Media	2,116	2,116	1,975
I_sup	2,213	2,165	2,072
I_sup-I_inf	191	415	452
(I_sup-I_inf)/Media	9%	20%	23%

Tabla 8-1: Estadísticas de fino de cobre total in situ [t] del plan de 5 días por tipo de incertidumbre

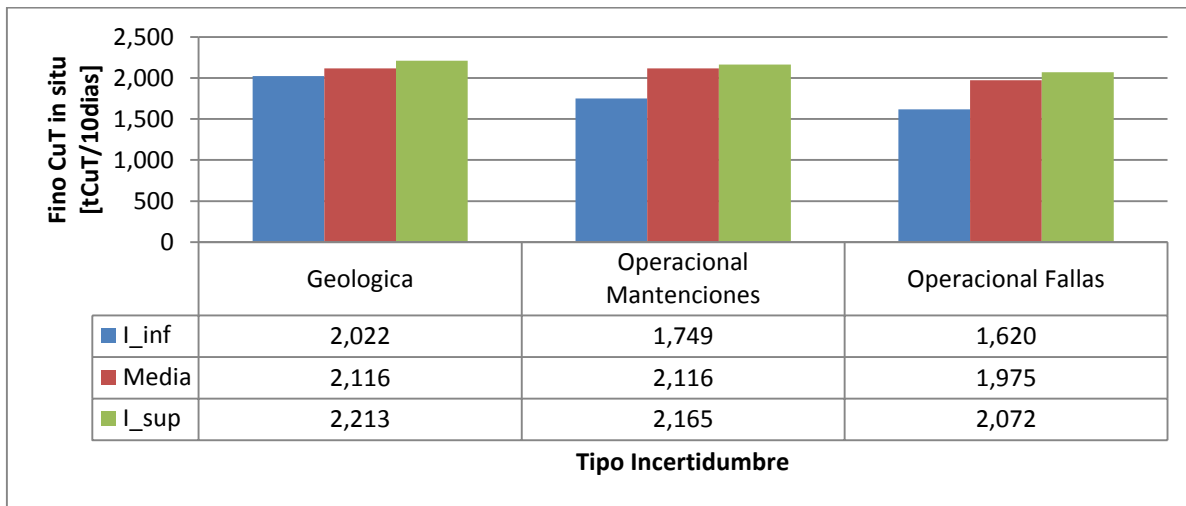


Gráfico 8-1: Fino de cobre total in situ [t] del plan de 5 días por tipo de incertidumbre

8.1.2 Comparación de finos de cobre soluble in situ

Estadística	Geológica	Operacional Mantenciones	Operacional Fallas
-------------	-----------	--------------------------	--------------------

I_inf	1,398	1,154	1,069
Media	1,480	1,480	1,381
I_sup	1,562	1,598	1,530
I_sup-I_inf	164	444	462
(I_sup-I_inf)/Media	11%	30%	33%

Tabla 8-2: Estadísticas de fino de cobre soluble in situ [t] del plan de 5 días por tipo de incertidumbre

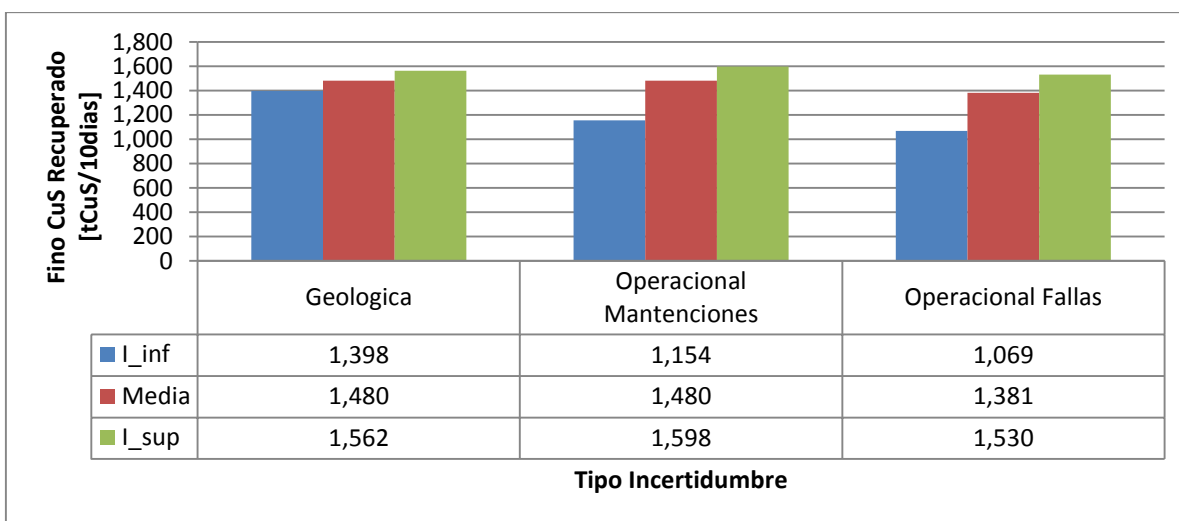


Gráfico 8-2: Fino de cobre soluble in situ [t] del plan de 5 días por tipo de incertidumbre

El resumen consolidado de las estadísticas de medida central (media) y de dispersión para las incertidumbres geológicas y operacionales se muestran en la Tabla 8-3 y Tabla 8-4.

Estadístico	Incertidumbre Operacional Mantenciones	Incertidumbre Operacional Fallas
Media Producción [kt/10días]	66.88	62.4
Media - I_inf [kt/10días]	9.36	9.04
I_sup - media [kt/10días]	1.23	2.49
I_sup - I_inf [kt/10días]	10.59	11.53
(media - I_inf)/media	14.0%	14.5%
(I_sup - media)/media	1.8%	4.0%
(I_sup - I_inf)/media	15.8%	18.5%

Tabla 8-3: Estadísticas de movimiento de material para incertidumbre operacional

Estadístico	Incertidumbre Geológica para Cobre Total	Incertidumbre Geológica para Cobre Soluble
-------------	--	--

Media Ley [%/10días]	0.39	0.27
Media - I_inf [%/10días]	0.04	0.03
I_sup - media [%/10días]	0.02	0.02
I_sup - I_inf [%/10días]	0.02	0.02
(media - I_inf)/media	9.48%	11.64%
(I_sup - media)/media	4.68%	5.85%
(I_sup - I_inf)/media	4.79%	5.79%

Tabla 8-4: Estadísticas de ley de cobre total y soluble para incertidumbre geológica

A partir de los resultados anteriores se observa que:

A partir de la Tabla 8-3 se aprecia que el fino de cobre in situ tiene medias iguales para las IG y IOM. Esto era esperado puesto que son casos hechos para ser comparados en forma directa. Por otro lado, la media de cobre fino recuperado en el caso IOF es un 6.7% menor que en IG y IOM, tanto en el caso del cobre total y cobre soluble. Esto sucede porque al considerar interrupción de operación de equipos de carga como fallas (en el caso IOF), ocurren traslapes en donde más de dos equipos de carga no están operativos, por lo tanto, la producción de mineral cae y en consecuencia, la producción de cobre fino.

En cuanto a las estadísticas de dispersión, a partir de la Tabla 8-3 y Tabla 8-4, se observa que el rango del intervalo de confianza a una confiabilidad de 95%, es creciente en los casos de la IG, IOM y IOF.

- En el caso de la IG, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 9% y 11% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.
- En el caso de la IOM, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 20% y 30% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.
- En el caso de la IOF, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 23% y 33% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.

En cuanto a la simetría de los intervalos de confianza en torno a la media se observa lo siguiente:

A partir de la Tabla 8-3 se constata que la distribución tanto para la IOM y IOF no es simétrica. Ambas comparten el hecho de que el intervalo inferior es mayor que el intervalo superior. Esto ocurre porque la cantidad de réplicas que obtienen mayores producciones es mayor que las réplicas que obtienen producciones menores por dos razones:

- En los casos de la IOM y IOF, estadísticamente es menos probable (pero posible) un traslape de camiones en una misma zona de intervalo de tiempo, lo que impacta negativamente a la producción. Lo más probable es que los camiones fallen en forma uniforme en la mayoría de las réplicas, lo que trae como consecuencia un impacto positivo en la producción.
- En el caso de la IOF, estadísticamente es menos probable (pero posible) un traslape de equipos de carga en una misma zona de intervalo de tiempo, lo que aún más impacta aún más negativamente (en comparación con los camiones) a la producción. Lo más probable es que los equipos de carga fallen en forma uniforme en la mayoría de las réplicas, lo que trae como consecuencia un impacto positivo en la producción.

A partir de la Tabla 8-4, se constata que la distribución de las leyes de cobre total y soluble de alimentación a planta para el caso de IG es simétrica. Este hecho es teóricamente esperado, por la siguiente razón:

El agrupamiento de bloques en polígonos implica una suma de variables aleatorias (cada bloque es una variable aleatoria) y por el Teorema Central del Límite, la distribución tiende a una normal.

Finalmente, es posible analizar analíticamente las estadísticas de dispersión de los finos de cobre según la incertidumbre considerada. En efecto:

Si se considera solo la incertidumbre en ley de mineral en la evaluación de los estadísticos de dispersión se tiene lo siguiente:

$$F = M \cdot z$$

$$\Delta F^+ = M \cdot (z + \Delta z^+)$$

$$\Delta F^- = M \cdot (z - \Delta z^-)$$

$$\Delta F = \Delta F^+ - \Delta F^- = M \cdot (\Delta z^- + \Delta z^+)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta F^+ - \Delta F^-}{F} = \frac{\Delta z^- + \Delta z^+}{z}$$

Si se considera solo la incertidumbre en tonelaje de mineral en la evaluación de los estadísticos de dispersión se tiene lo siguiente:

$$F = M \cdot z$$

$$\Delta F^+ = (M + \Delta M^+) \cdot z$$

$$\Delta F^- = (M - \Delta M^-) \cdot z$$

$$\Delta F = \Delta F^+ - \Delta F^- = (\Delta M^- + \Delta M^+) \cdot z$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta F^+ - \Delta F^-}{F} = \frac{\Delta M^- + \Delta M^+}{M}$$

Donde:

z : Media de finos de cobre in situ.

Δz : Rango de intervalo de confianza de finos de cobre in situ.

Δz^+ : Diferencia entre el intervalo superior de cobre fino y la media de cobre fino in situ

Δz^- : Diferencia entre la media de cobre fino in situ y el intervalo inferior de cobre fino in situ

M : Media de finos de cobre in situ.

ΔM : Rango de intervalo de confianza de finos de cobre in situ.

ΔM^+ : Diferencia entre el intervalo superior de cobre fino y la media de cobre fino in situ

ΔM^- : Diferencia entre la media de cobre fino in situ y el intervalo inferior de cobre fino in situ

F : Media de finos de cobre in situ.

ΔF : Rango de intervalo de confianza de finos de cobre in situ.

ΔF^+ : Diferencia entre el intervalo superior de cobre fino y la media de cobre fino in situ

ΔF^- : Diferencia entre la media de cobre fino in situ y el intervalo inferior de cobre fino in situ

Observando las expresiones para el rango de intervalo de confianza partido por la media para los finos de cobre in situ, se aprecia que esta estadística depende solamente de la magnitud del intervalo de confianza de la incertidumbre considerada en cada caso.

9 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta para la cuantificación de la incertidumbre operacional de un sistema minero a cielo abierto mediante la conceptualización e implementación de un modelo de simulación por eventos discretos.

Se ha propuesto un caso de estudio de una faena minera a cielo abierto ubicada en el norte de Chile, que explota actualmente óxidos de cobre. Se ha caracterizado la incertidumbre operacional del caso de estudio para los tres tipos de incertidumbre identificados:

- Parámetros: Obtención de distribuciones de probabilidad.
- Eventos: Modelo de indisponibilidad de equipos de carga y descarga.
- Reasignaciones: Estudio de escenarios de casos de indisponibilidad de componentes mineros.

Se ha caracterizado la incertidumbre geológica del caso de estudio mediante la realización de 1000 simulaciones condicionales de la ley de cobre total y soluble.

Posteriormente se ha determinado una serie de experimentos de manera de evaluar el impacto de los tres tipos de incertidumbre operacional en los resultados del plan minero. También se ha propuesto una metodología para evaluar el impacto de la incertidumbre geológica en los resultados del plan minero a partir del movimiento de material promedio bajo 1000 simulaciones operacionales.

A partir del análisis de los resultados del caso de estudio se desprenden las siguientes conclusiones.

9.1 Conclusiones generales

- La incertidumbre operacional tiene impacto en los resultados del plan minero. La principal fuente de variabilidad viene de los eventos y reasignaciones y no de los parámetros.
- La variabilidad de los parámetros operacionales no es suficiente para expresarse en los resultados del plan en comparación a la variabilidad de los eventos y reasignaciones, los cuales manejan fuertemente la media debido a que gobiernan la manera de realizar la producción, incidiendo en la cantidad y tipo de ciclos productivos por equipo de carga, frente de carga y destino.
- La media de movimiento de material depende del modelo de indisponibilidad del equipo de carga. El modelo variable, el cual está relacionado con las fallas de equipos de carga, obtiene una media de movimiento de material alrededor de un 6.7% menor en comparación al modelo fijo, relacionado con las mantenciones de los equipos de carga.

- Para una misma característica geológica (por ejemplo, la ley de cobre total), polígonos de extracción diferentes tienen distintos niveles de incertidumbre. Este distinto grado de magnitud dependerá, entre otras cosas, de lo siguiente:
 - Continuidad espacial de leyes en el lugar de ubicación del polígono.
 - Su nivel de muestreo (dado por la cantidad y ubicación de los datos originales, obtenidos de los pozos de tronadura en este caso)
 - Su soporte físico (referido a la cantidad de masa o volumen contenido por el polígono).
- En el caso de estudio considerado, el rango del intervalo de confianza a una confiabilidad de 95%, es creciente en los casos de la IG, IOM y IOF.
 - En el caso de la IG, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 9% y 11% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.
 - En el caso de la IOM, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 20% y 30% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.
 - En el caso de la IOF, el rango del intervalo de confianza partido por la media de finos in situ es del orden de 23% y 33% para el cobre total y cobre soluble, respectivamente.
- La distribución del movimiento de material en los casos de IOM y IOF no es simétrica por los traslapes de los camiones y equipos mineros. El centro de masa de la distribución está concentrada a la derecha de la distribución. Esto se produce porque estadísticamente es menos probable obtener réplicas con menores producciones debido a traslapes en ausencia de operación de camiones y traslapes de equipos de carga a lo largo de las réplicas.
- La distribución de las leyes de cobre total y soluble de alimentación a planta para el caso de IG es simétrica, debido a que el agrupamiento de bloques en polígonos implica una suma de variables aleatorias (cada bloque es una variable aleatoria) y por el Teorema Central del Límite, la distribución debe tender a una normal.

9.2 Comentarios finales

9.2.1 Interpretación de operación minera a corto plazo

La operación minera es una secuencia de extracción de polígonos, la cual se ve afectada a lo largo del tiempo por los cambios en las condiciones operacionales intrínsecas de los equipos e instalaciones y de los mismos polígonos que forman parte del sistema de manejo de materiales.

9.2.2 Incertidumbre operacional referida a parámetros operacionales

A partir del caso de estudio se concluye que la incertidumbre asociada a los parámetros operacionales no es relevante en términos de resultados del sistema de manejo de materiales. Es decir, basta con alimentar parámetros operacionales con una buena estimación de la media para describir al sistema de manera correcta.

9.2.3 Eventos, estados y reasignaciones operacionales

Un evento operacional causa un cambio de estado operacional del sistema. Cada cambio de estado del sistema provoca inevitablemente una reasignación de los componentes del sistema para adaptarse al cambio de estado operacional.

9.2.4 Reasignaciones operacionales: planificación reactiva vs preventiva

Un cambio de estado del sistema produce inevitablemente una reasignación de los componentes del sistema. Esto involucra una toma de una decisión de reasignación de los componentes. Esta reasignación puede estar definida de antemano o especificada en el momento por operaciones mina. La ausencia de una planificación preventiva de reasignación de equipos ante cambios operacionales otorga el nivel más significativo de incertidumbre operacional y al mismo tiempo es el más controlable puesto que la decisión de reasignación es tomada por operaciones mina. Para reducir este tipo de incertidumbre debe contarse con protocolos de reasignación de componentes ante cambios de estado operacionales. Es decir, pasar de una reasignación operacional reactiva a preventiva. Sin embargo, es cuestionable la obtención de protocolos operacionales para todos los cambios de estados posibles, puesto que se debe ser exhaustivo en ellos. Además, dados los múltiples objetivos del sistema, podría más de una única reasignación operacional ser plausible.

Una alternativa a los protocolos operacionales es la aplicación de un problema de optimización lineal de asignación de componentes mineros que se resuelva cada vez que ocurre un cambio operacional en el sistema. Sin embargo, surgen otros temas a solucionar tales como encontrar la mejor forma de realizar la transición entre estados y el tema de la infactibilidad del problema.

9.2.5 Generación de habilitaciones de equipos de carga y descarga

El supuesto de que las habilitaciones de equipos de carga y descarga sean regidas por distribuciones de probabilidad para el tiempo entre fallas y el tiempo para reparar es una aproximación a la realidad operacional, en donde

se intenta traslapar de forma conveniente tiempos en ausencia de operación entre equipos asociados a mantenencias programadas.

9.2.6 Esquemas de generación de tiempos en ausencia de operación

Los esquemas de generación de tiempos en ausencia de operación para equipos de carga del tipo variable y fijo con traslape mínimo otorgan cotas superiores e inferiores de la cantidad de material transportado.

La magnitud de la desviación del plan original originadas por las fallas de componentes operacionales dependerá de los siguientes aspectos:

- La naturaleza de la falla del componente minero.
- La incidencia de fallas de componentes operacionales.
- La reasignación operacional elegida como reacción al cambio operacional.
- La duración temporal del estado operacional en falla.

9.2.7 Dependencia del desempeño del plan minero de las relaciones entre habilitaciones de equipos de carga y descarga

El desempeño del sistema minero no depende solamente de la magnitud de la habilitación de los equipos de carga si no del número de eventos de inhabilitaciones y su incidencia temporal. A un mismo nivel de inhabilitación total se prefiere el menor número de eventos de inhabilitación puesto que al aumentar el número de inhabilitaciones, aumenta el número de ineficiencias operacionales de los equipos de transporte explicadas por las reasignaciones de equipos de transporte a circuitos productivos en operación.

9.2.8 Estados operacionales y desempeño del sistema de manejo de materiales

La estimación del desempeño del sistema de manejo de materiales solamente por medio de la magnitud de inhabilitación de sus componentes es insuficiente. Una estimación correcta debe estar basada en la secuencia y duración de estados operacionales por los cuales atraviesa el sistema y la reasignación de los componentes de sistema en cada una de las transiciones entre estados.

9.2.9 Incidencia de los tipos de incertidumbre operacional

La mayor incidencia en términos de desempeño del sistema de manejo de materiales se encuentra gobernada por una combinación entre la incertidumbre asociada a los eventos operacionales junto con la incertidumbre

operacional asociada a las reasignaciones operacionales más que en la incertidumbre asociada a los parámetros operacionales.

9.2.10 Potencial eliminación total del tipo de incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales

Es posible eliminar totalmente la incertidumbre asociada a reasignaciones operacionales teniendo un protocolo de reasignaciones operacionales para cada cambio de estado operacional. Este protocolo puede ser del tipo explícito (mediante tablas) o bien mediante la resolución de un problema de optimización lineal entero mixto que asigne componentes mineros ante cambios operacionales.

9.2.11 Efecto no significativo de la incertidumbre operacional referida a los parámetros operacionales

La alimentación de parámetros operacionales en forma de distribuciones de probabilidad no agrega un valor significativo a la estimación de los resultados del sistema de manejo de materiales. Una media de los parámetros operacionales es suficiente para describir el sistema.

9.2.12 Incertidumbre operacional de acuerdo a interacción de componentes operacionales

La incertidumbre operacional de acuerdo a las interacciones entre componentes mineros que se traducen en esperas en cola y demoras en ruta es considerada en forma total mediante el modelo de simulación descrito.

9.2.13 Impacto en los resultados del plan ante eventos operacionales

El impacto en los resultados del plan ante eventos operacionales dependerá de la naturaleza del evento, del estado operacional actual y de la reasignación operacional asociada. La multitud de elementos involucrados hacen complejo su estudio y análisis en forma conjunta, por lo que estudios acotados fueron realizados.

10 TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo del trabajo, se vislumbraron una serie de aspectos que permiten ampliar y con ello mejorar la calidad de la evaluación de la incertidumbre geológica y operacional. Éstas se listan a continuación:

Mejoras propuestas al modelo de simulación

Se han detectado oportunidades de mejora al modelo de simulación desarrollado- Las mejoras mencionadas apuntan a una mejor estimación de la performance del sistema de manejo de materiales. Las mejoras propuestas se listan a continuación.

- Incorporación de un modelo de reasignación de equipos de carga y de equipos de transporte frente a cambios de estado operacionales: Una única relación entre cambio de estado operacional y su reasignación debe ser permitida de manera de eliminar la incertidumbre referida a las múltiples opciones de reasignación de equipos. No obstante, debido a las múltiples posibilidades de reasignación de equipos, también se debe permitir al simulador varias opciones de reasignación de forma de compararlas entre sí.
- Asignación en tiempo de simulación de equipos de carga con los polígonos de extracción: El modelo de simulación actual predefine la asignación de los equipos de carga con los polígonos de extracción al inicio de la simulación. Esta asignación se mantiene fija en todo el tiempo de simulación. Una mejora propuesta al modelo es que, una vez que el polígono de extracción es agotado por el equipo de carga asociado, el equipo de carga tenga un criterio de decisión que le indique qué polígono extraer en función de los frentes de carga disponibles, su accesibilidad operacional, el tipo y calidad del material contenido y el tiempo de instalación de la frente actual a la nueva frente. Un primer criterio propuesto es que una vez un equipo de carga agota su polígono actual, extraerá el frente de carga tronado que no esté ocupado por algún otro equipo de carga. Esta mejora permitirá ampliar el tiempo de simulación del modelo.
- Asignación de la operación de tronadura en tiempo de simulación. La secuencia de polígonos de tronadura está definida pero debe estar alineada con los avances de extracción, la capacidad de las operaciones de perforación y tronadura y los horarios predefinidos de tronadura (diurna, usualmente en hora de almuerzo). El momento de realización de la operación de tronadura debe ser agendado en tiempo de simulación.

- Incorporación de distintos tipos de políticas de despacho de camiones de extracción. Estos distintos tipos de políticas de despacho fueron mencionados en el capítulo de revisión bibliográfica.
- Integración de la operación de perforación y tronadura en forma explícita en el modelo de simulación en dos aspectos: Incorporación de polígonos de extracción que pasan del estado de estar in-situ a estar en estado tronado. Incorporación de las demoras por tronadura en función de su interferencia con los frentes de carga activos que caen dentro del radio de influencia de la tronadura en curso.
- Modelos de consumo de combustible para equipos de carga correspondientes y equipos de transporte. Una propuesta de modelo de consumo de combustible para equipos de transporte sería un consumo lineal en términos de [lt/hr] en función del estado en que se encuentre el camión: subiendo/bajando/horizontal cargado/descargado, detenido. Un criterio de reabastecimiento de combustible de camiones es cuando el nivel actual de combustible alcanza un nivel por debajo de un nivel umbral predefinido (en operaciones mineras se maneja un nivel umbral de 20% a 30% de la capacidad del estanque total). Un modelo propuesto de consumo de equipos de carga tendrá que ver con la cantidad de maniobras de carga y sus traslados.
- Modelo de tiempos de traslado de equipos de carga. Dependiendo de la naturaleza del equipo de traslado, y la pendiente del tramo a recorrer se tendrán distintas velocidades de traslado.
- Modelo tiempos de montaje y desmontaje de frentes de carga. Los tiempos de las operaciones necesarias de limpieza de cancha, instalaciones de cables para el montaje y desmontaje de frentes de carga deben ser considerados. Un primer modelo es un tiempo fijo de montaje y desmontaje en función del equipo de carga a ubicarse al frente de carga.

Mejoras geológicas

- Modelo de mezclas de stocks: Para la evaluación completa de la ley de alimentación a chancado primario es necesaria la incorporación la componente de alimentación proveniente de stocks. Para ello, un modelo de mezclas de leyes de stocks debe ser incorporado al modelo de simulación.
- Incorporación de variables categóricas: Para evaluar las características geológicas que escapan del alcance del estudio tales como litología, tipo de alteración, etc.

11 BIBLIOGRAFÍA

Banks, J. 1999. *Discrete event simulation*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. pp. 7-13, 1999.

Banks, J., Carson II J., Nelson, B., Nicol D., 2000. *Discrete-Event System Simulation*. 2000.

Ben-Awuah, Eugene. 2013. *Oil sands mine planning and waste management using goal programming*. Ph. D. Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering. University of Alberta. Edmonton, Canada, 2013.

Çetin, N. 2004. *Open-Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation*. Ph. D. Tesis. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2004.

Codelco. 2005. *Norma ASARCO*. Documento Interno. División Codelco Norte. Junio 2005, 2005.

Dimitrakopoulos, R. 1998. *Conditional simulations algorithms for modelling orebody uncertainty in open-pit optimization*. Int. J. Surface Mining Reclamation Environment, 12, no4, 173-9, 1998.

Dimitrakopoulos, R. 2011. *Stochastic Mine Planning – Methods, Examples and Value in an Uncertain World*. Advances in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning I, 2011.

Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C. T. and Cheuiche Godoy, M. 2002. *Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open-pit design*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, III A82-A88, 2002.

Dowd, P. 1994. *Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning*. Tran. Instn. Min. Metall (Sect. A: Min industry), 103, A148-54, 1994.

Dowd, P. 1998. *Risk in minerals projects: analysis, perception and management*. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry), 106.A9-18, 1998.

Eivazy, H., Askari-Nasab, H. 2012. *A mixed integer linear programming model for short-term open pit mine production scheduling*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 121(2), 97-108, 2012.

Emery, X. 2009. *Tópicos avanzados en evaluación de yacimientos.* Departamento de Ingeniería de Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 2009.

Emery, X., Carrasco, P., Ortiz, J. 2004. *Modelamiento geoestadístico de la razón de solubilidad en un yacimiento de oxidados de cobre.* Minin 2004, 2004.

Fioroni, M., Bianchi, T., Pinto, R., Franzece L., Ezwara, L., Miranda Jr, G. 2008. *Concurrent simulation and optimization models for mining planning.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008.

Hall, B. E. 2000. *Simulation Modeling of Mining Systems.* MassMin 2000, p. 83-95, 2000.

Hochbaum, D. S., Chen, A. 2000. *Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem.* Operations Research, 48 (6), 894-914, 2000.

Hustrulid, W. A., Kuchta, M. 2006. *Open pit mine planning & design. Vol.1* . Taylor and Francis, London, 2006.

Johnson, T. B. 1969. *Optimum production scheduling.* in Proceedings of 8th International Symposium on Computers and Operations Research, pp. 539-562, 1969.

Kazakidis, V., Mayer, Z. 2007. *Decision making in flexible mine production system design using real options.* Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 133, No. 2, p. 169-180, 2007.

Kolonja, B. 1992. *Simulation Analysis of Dispatching Strategies for Surface Mining Operations Using SIMAN.* M. Sc. Thesis, Pennsylvania State University, 1992.

Lavenberg, S., Reiser, M. 1980. *Mean Value Analysis of Closed Multichain Queueing Networks.* Journal of the ACM. Vol. 27 No. 2, 1980.

Lerchs, H., Grossmann I. F. 1965. *Optimum Design of Open Pit Mines.* Canad. Inst. Mining Bull. 58, p. 47-54, 1965.

Lobão, E., Porto, A. J. V. 1999. *Proposta para sistematização de estudos de simulação.* Revista Engenharia Arquitetura, EESC-USP, 1(2): 61-69, 1999.

Manfrino, A. 1999. *Impact of high risk grade zones in optimal pit limits: a sensitivity study in a gold deposit.* In Int. Symp. geostatistical simulations

mining: uncertainty models, risk analysis and optimization of mining operations. CD, Bryan Research Centre, ISBN 186499 3855, Brisbane, Australia, 1999.

Mehager, C., Abdel Sabour, S. A., Dimitrakopoulos, D. 2010. *Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties*. Orebody Modelling & Strategic Mine Planning, AusIMM Spectrum Series 17:297-304, 2010.

Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., Arata, A. 2013. *Availability-based simulation and optimization modeling framework*. International Journal of Mining Science and Technology 23 (2013) 113–119, 2013.

Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., and Eurek, K. 2010. *A review of operations research in mine planning*. Interfaces, 40 (3), 222-245, 2010.

Newman, A., Rubio, E., Caro, E., Weintraub, A. 2007. *A review of operations research in mine planning*. Workshop on Operations Research in Mining. p. 1-13, 2007.

Palma, J. 2014. *Cátedra Simulación de Procesos Mineros*. Departamento de Ingeniería de Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 2014.

Ravenscroft, P. J. 1992. *Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation*. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry), 101, A104–8, 1992.

Rendu, J-M. 1999. *Geostatistical simulations for risk assessment and decision making: The mining industry perspective*. Int. Symp. geostatistical simulations mining: uncertainty models, risk analysis and optimization of mining operations. CD, Bryan Research Centre Brisbane, Australia, 1999.

Rossi, M. E., Camacho J. V. 2000. *Using meaningful reconciliation to evaluate predictive models*. Trans. Soc. Min. Met. Explor. 308, 78-82, 2000.

Rossi, M. E., Parker, H. M. 1994. *Estimating recoverable reserves-is it hopeless?* Geostatistics for the next century, 259-76, 1994.

Rubio, E. 2006. *Block Cave mine infrastructure reliability applied to production planning*. PhD Thesis. The University of British Columbia. The Faculty Of Graduate Studies (Mining Engineering), 2006.

- Shannon, R. 1975.** *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 387, 1975.
- Smith, M., Dimitrakopoulos, R. 1999.** *Influence of deposit modelling on mine production scheduling*. Int. J. Surface Mining Reclamation Environment, 13, 173–8, 1999.
- Tan, S., Ramani, R. V. 1992.** *Evaluation of Computer Truck Dispatching Criteria*. Preprint 92-215, SME AIME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, 1992.
- Torkamani, E. 2013.** *Linkage of Truck-and-shovel Operations to Short-term Mine Plans Using Discrete Event Simulation*. Master of Science Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering. University of Alberta, 2013.
- Troncoso, M. F. 2009.** *Modelo de planificación de corto plazo aplicado a la mina Spence*. Memoria Ingeniería Civil de Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 2009.
- Vann, J., Bertoli, O., Jackson, S. 2002.** *An Overview of Geostatistical Simulation for Quantifying Risk*. Geostatistical Association of Australasia symposium "Quantifying Risk and Error" March, 2002, 2002.
- Whittle, J. 1989.** *The facts and fallacies of open pit design*. Whittle Programming Pty Ltd, North Balwyn, Victoria, Australia, 1989.

12 ANEXO A: ABSTRACT MINEPLANNING 2015

Evaluación de incertidumbre geológica y operacional en planes mineros a corto plazo a cielo abierto

Fabián A. Manríquez*

Delphos Mine Planning Laboratory, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile, MSc. Candidate Student, +56 9 9677 3407, fmanriquez@ing.uchile.cl

Marcelo A. Navarrete

Delphos Mine Planning Laboratory, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile, Mine Planning Graduate Student, +56 2 2978 4503, mnava017@codelco.cl

Nelson V. Morales

Delphos Mine Planning Laboratory, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile, Director, +56 2 2978 4503, nelson.morales@amtc.cl

RESUMEN

La actividad minera está sujeta a tipos de incertidumbre: mercado, geológica y operacional, las cuales provocan diferencias entre los resultados del plan minero real y esperado. La evaluación del impacto de éstas en los resultados del plan permite identificar las que mayor impacto tienen y tratar de gestionarlas a priori.

En este trabajo se realiza la evaluación del impacto de la incertidumbre geológica y operacional en los resultados del plan minero a corto plazo en faenas a cielo abierto.

Dentro de la incertidumbre operacional, se considera la asociada a los parámetros operacionales (ej. velocidades, capacidades y tiempos), a los eventos operacionales (ej. mantenimientos y fallas) y a las reasignaciones operacionales (ej. reasignación de camiones ante una falla de una pala).

Se simula el sistema de manejo de materiales de una faena real. Con respecto a la incertidumbre geológica, se desarrollan simulaciones condicionales de la ley de cobre total, soluble y solubilidad a partir de datos de pozos de tronadura simulados.

Para la evaluación de la incertidumbre operacional, se toma un caso de estudio correspondiente a una faena minera a cielo abierto ubicada en el norte de Chile.

Los resultados muestran que para el caso de estudio las leyes de cobre total y cobre soluble en la alimentación a chancado no impactan significativamente a un plan con movimiento de material fijo. Asimismo, la incertidumbre operacional de los parámetros operacionales, tiene un impacto no significativo en el plan cuando se caracterizan por medio de medias o distribuciones de probabilidad. Finalmente, la incertidumbre asociada a los eventos operacionales y las reasignaciones operacionales sí impactan fuertemente los resultados del plan minero.

Fabián A. Manríquez: Delphos Mine Planning Laboratory, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, MSc. Candidate Student, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile. Teléfono: +56 9 9677 3407. Email: fmanriquez@ing.uchile.cl

13 ANEXO B: INCERTIDUMBRE OPERACIONAL

13.1 Aplicación MVA a casos de estudio minero

13.1.1 Ejemplo 1

El ejemplo A consta de un frente de carga FC_A y un destino CH. El diagrama de la red de cola se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Los parámetros de definición se muestran en la Tabla 13-1.

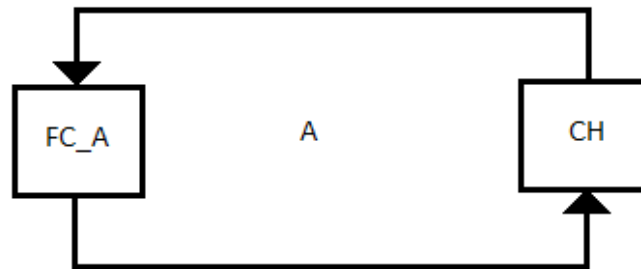


Figura 13-1: Esquema red de cola. Ejemplo 1

Centro de Carga	Tipo de Centro	Tiempo de Servicio [min]
Frente de Carga Mina	Queue	3.34
Frente de Descarga Chancador	Queue	2.45
Viaje Cargado	Delay	9.83
Viaje Descargado	Delay	4.75

Tabla 13-1: Parámetros de definición de la red de cola. Ejemplo 1

Los resultados de la productividad vs número de camiones estimados por el modelo lineal y por MVA se muestra en el Gráfico 13-1.

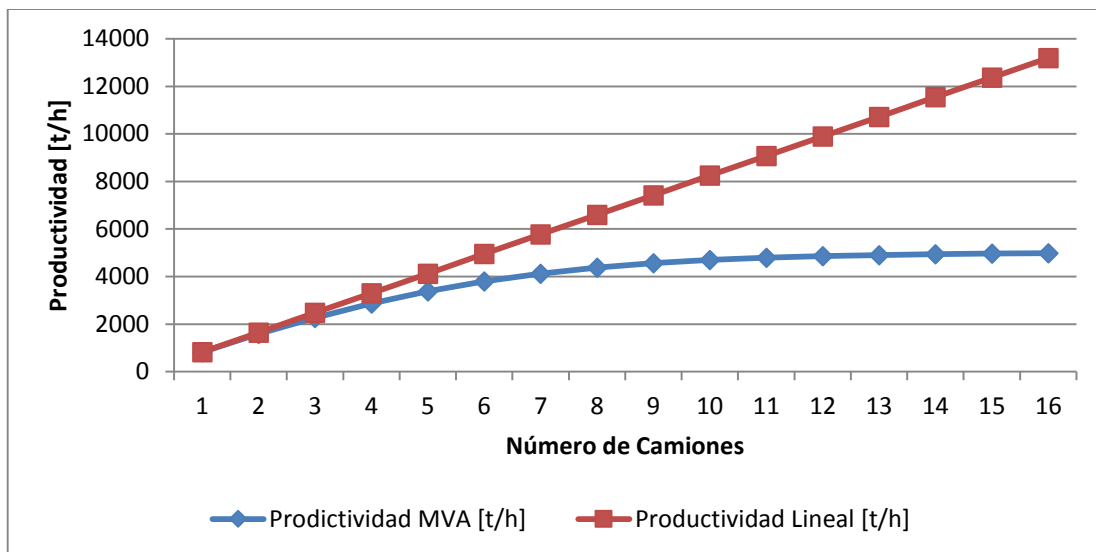


Gráfico 13-1: Productividad de la red de cola en función del número de camiones. Ejemplo 1

Los tiempos de espera en cola en los frentes de carga y descarga calculados por el modelo MVA se muestran en el Gráfico 13-2.

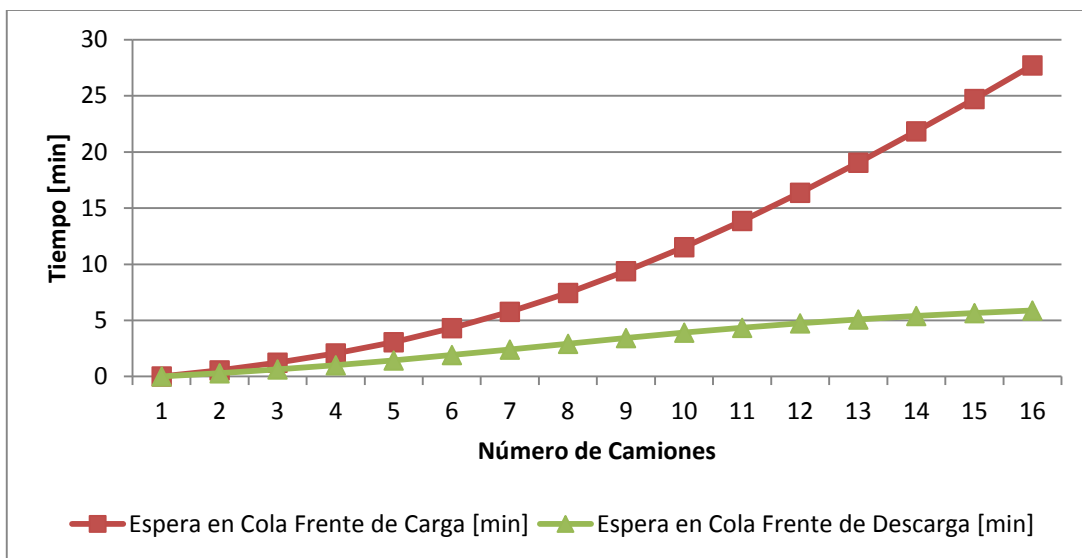


Gráfico 13-2: Tiempos de espera. Ejemplo 1

Los resultados del tiempo de ciclo calculadas por el modelo MVA se muestran en el Gráfico 13-3.

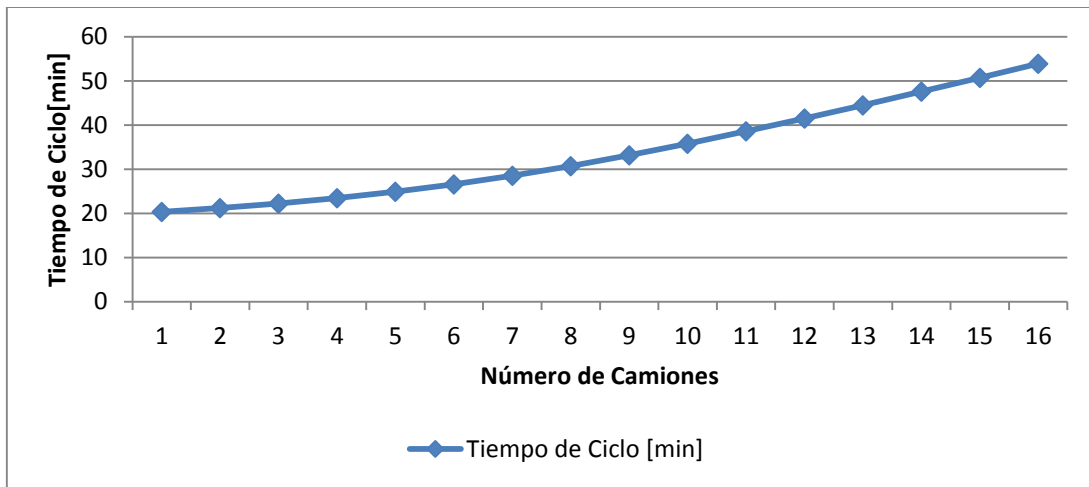


Gráfico 13-3: Tiempos de ciclo. Ejemplo 1

La utilización de los frentes de carga y descarga, entendida como el porcentaje en servicio de los frentes de carga y descarga con respecto al tiempo nominal, calculados por el modelo MVA se muestra en el Gráfico 13-4.

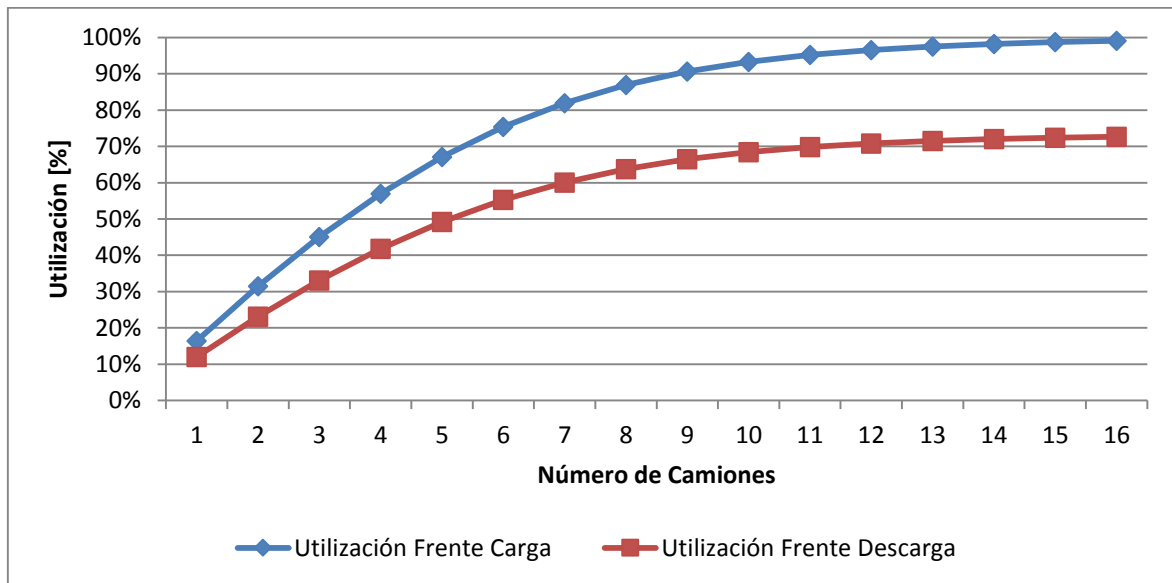


Gráfico 13-4: Utilización frentes de carga y descarga. Ejemplo 1

13.1.2 Ejemplo 2

Con el método MVA es posible cuantificar la performance de un sistema minera compuesto por entre dos ciclos que se ven influenciados entre sí. Esto puede ser realizado usando una extensión del método MVA, el cual los trabajos pueden pertenecer a diferentes clases. Ver Figura 13-2.

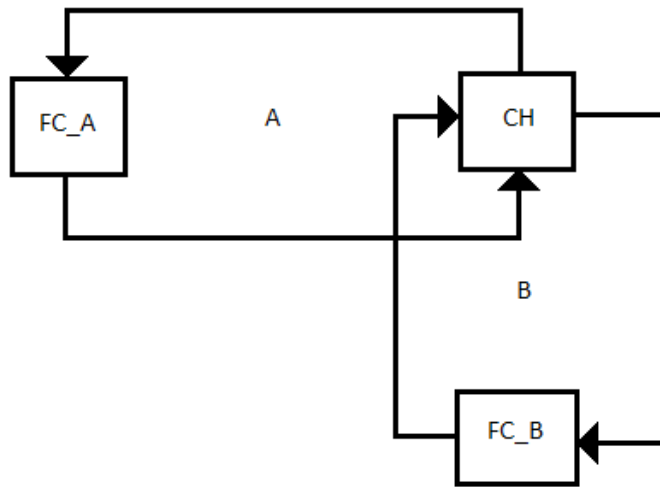


Figura 13-2: Esquema red de cola. Ejemplo 2

Los parámetros del ejemplo 2 se muestran en la Tabla 13-2.

Centro de Carga	Tipo de Centro	Tiempo de Servicio clase A [min]	Tiempo de Servicio clase B [min]
Frente de Descarga Chancador	Queue	2.45	2.45
Frente de Carga A	Queue	3.34	0.00
Frente de Carga B	Queue	0.00	7.62
Viaje Cargado A	Delay	9.83	0.00
Viaje Descargado A	Delay	4.75	0.00
Viaje Cargado A	Delay	0.00	3.44
Viaje Descargado A	Delay	0.00	2.28

Tabla 13-2: Parámetros de definición de la red de cola. Ejemplo 2

Los resultados de la productividad total, la productividad asociada al circuito A y la productividad asociada al circuito B vs el número de camiones en el circuito A (en el eje X) y en el circuito B (curvas de colores) estimados por el modelo MVA se muestra en el Gráfico 13-5, Gráfico 13-18 y Gráfico 13-19 respectivamente.

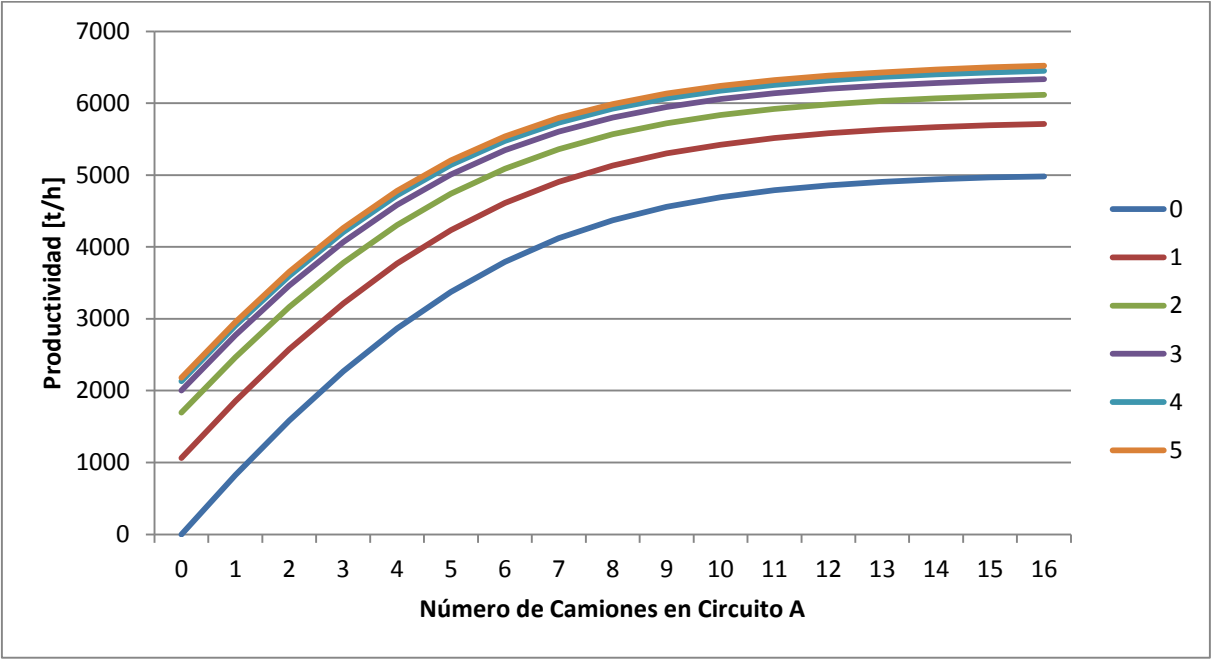


Gráfico 13-5: Productividad total de la red de cola en función del número de camiones en circuitos A y B

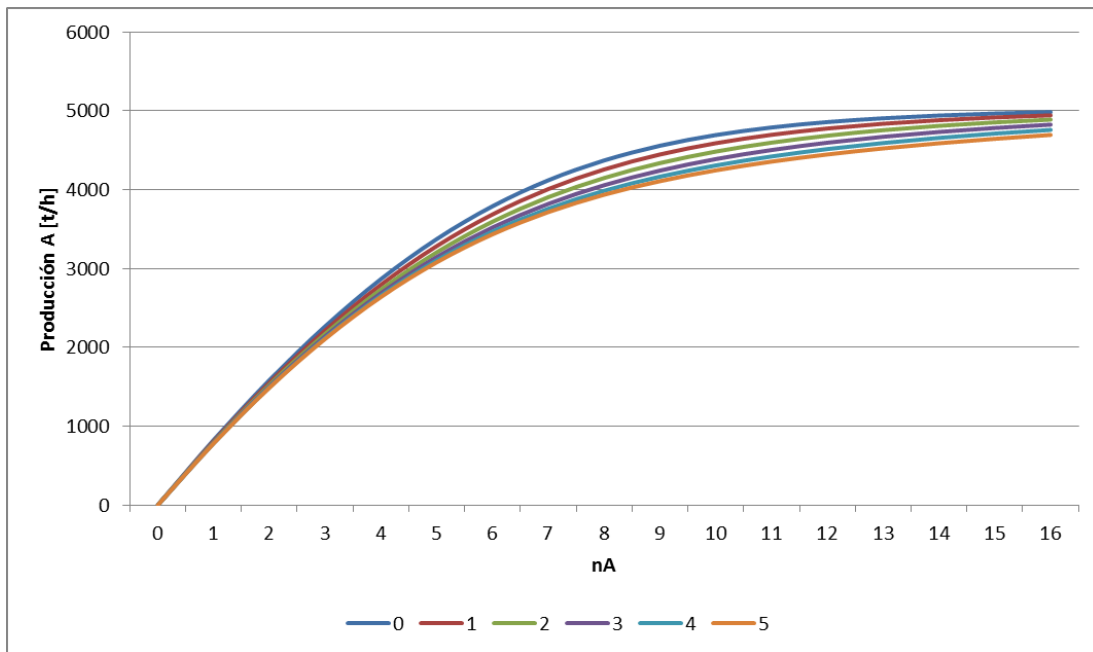


Gráfico 13-6: Productividad del circuito A en función del número de camiones en circuitos A y B

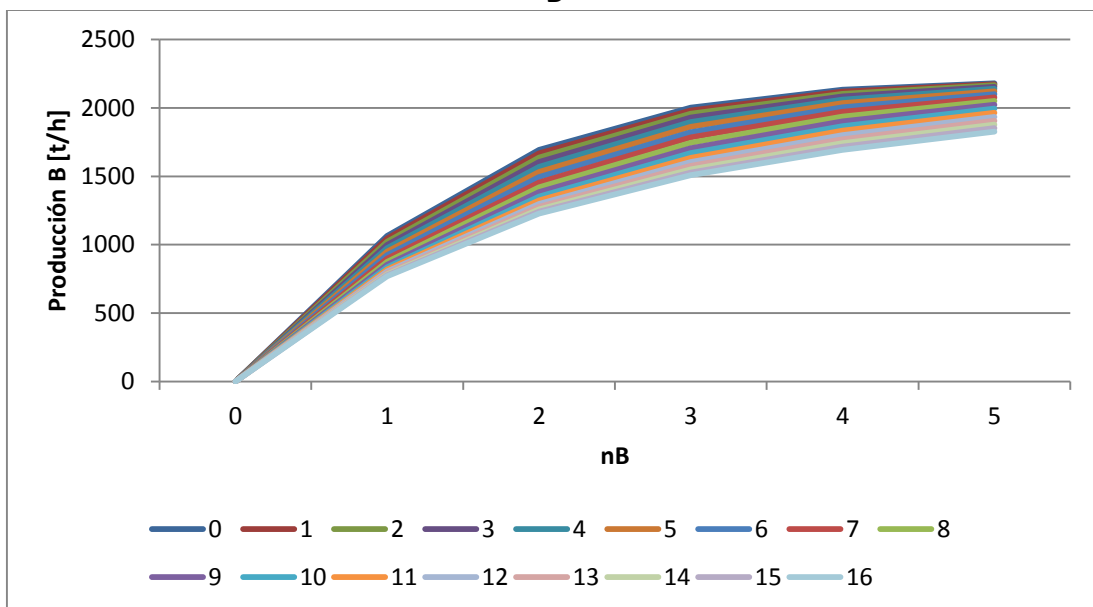


Gráfico 13-7: Productividad del circuito B en función del número de camiones en circuitos A y B

Los resultados de tiempo de ciclo asociado al circuito A y B en función del número de camiones en el circuito A (en el eje X) y en el circuito B (curvas de colores) estimados por el modelo MVA se muestra en el Gráfico 13-8 y Gráfico 13-9 respectivamente.

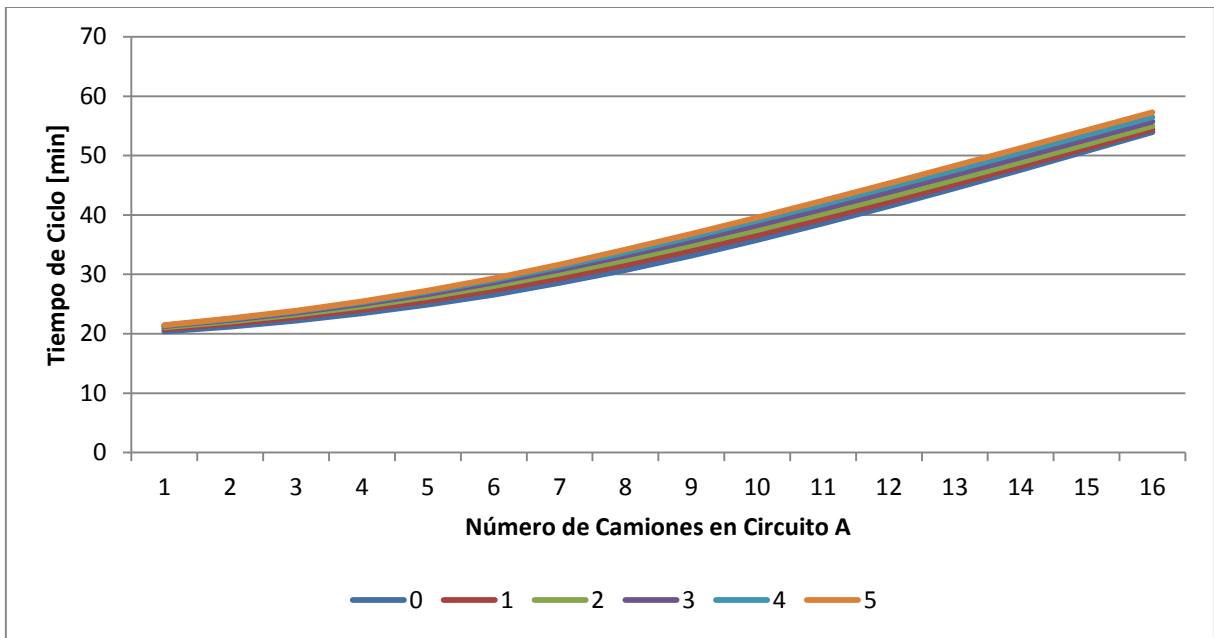


Gráfico 13-8: Tiempos de ciclo. Circuito A

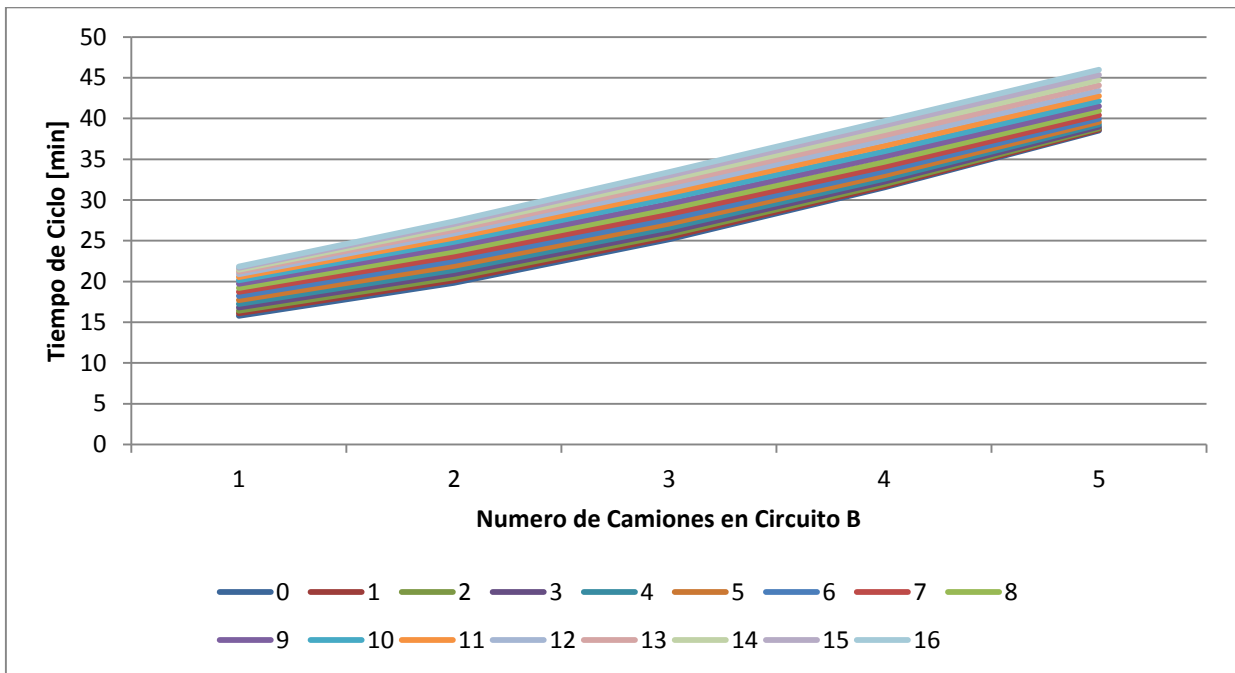


Gráfico 13-9: Tiempos de ciclo. Circuito B

La utilización del frente de carga A, frente de carga B y frente de descarga en función del número de camiones en el circuito A y B se muestra en el Gráfico 13-10, Gráfico 13-11 y Gráfico 13-12 respectivamente.

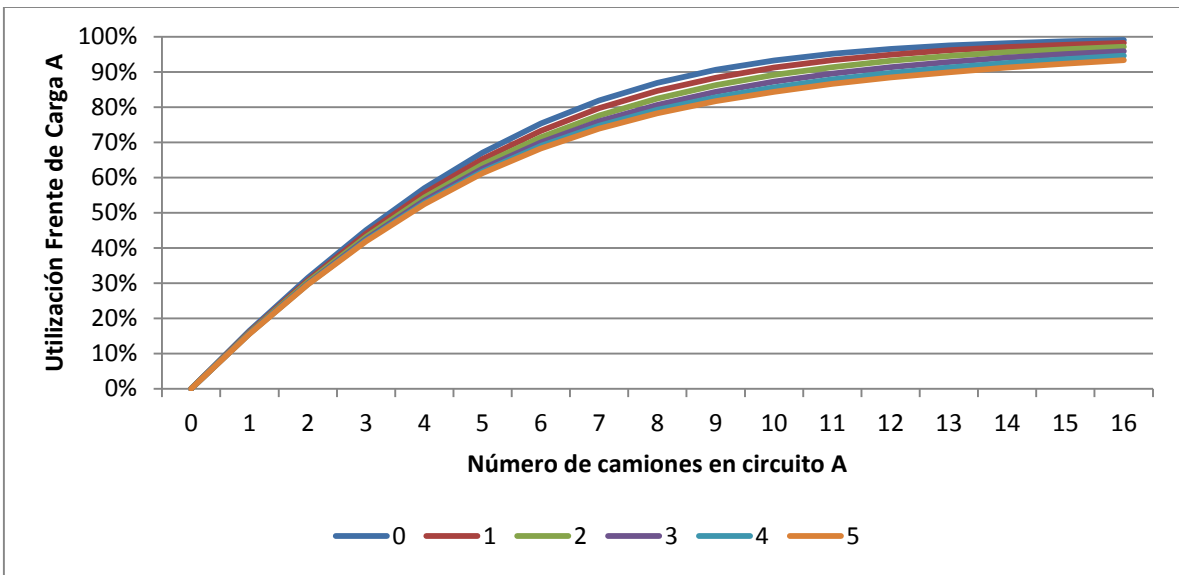


Gráfico 13-10: Utilización Frente de Carga A en función del número de camiones en circuito A y B

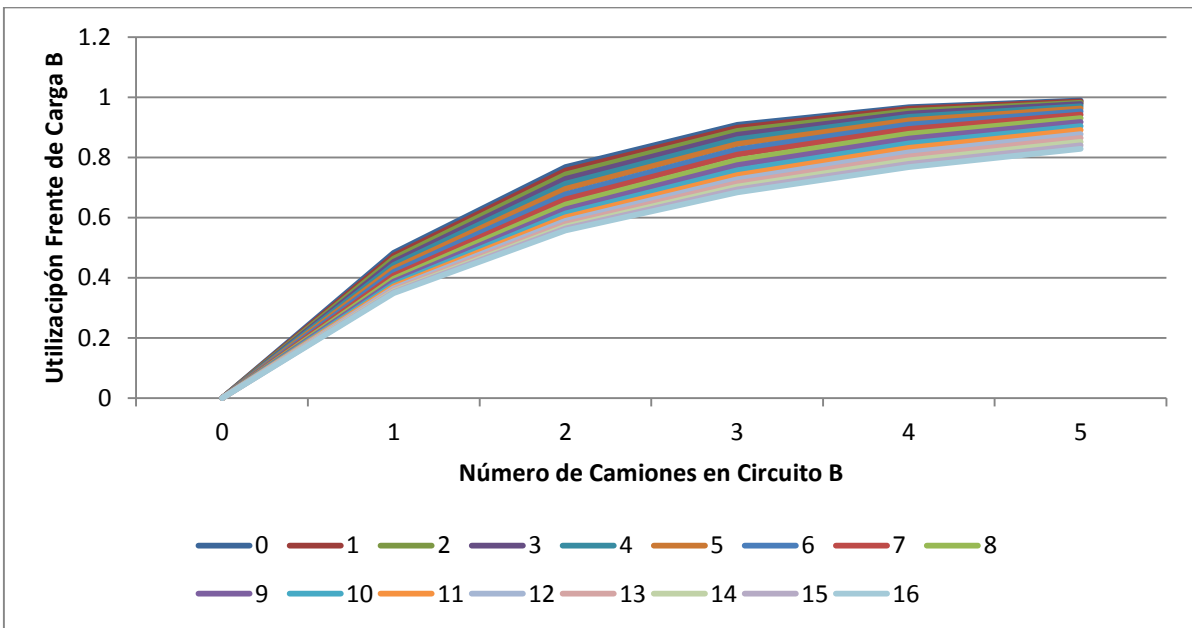


Gráfico 13-11: Utilización Frente de carga A en función del número de camiones en circuito A y B

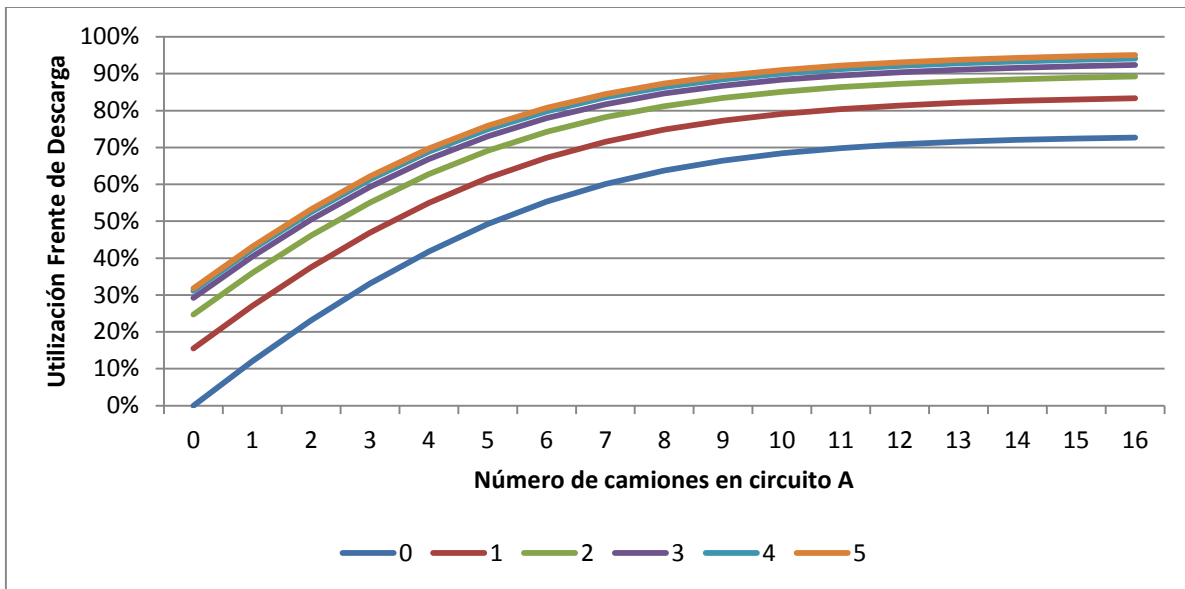


Gráfico 13-12: Utilización Frente de Descarga en función del número de camiones en circuito A y B

13.1.3 Comparación de productividades entre fórmulas analíticas vs MVA

Una comparación entre las productividades estimadas usando el método lineal y por MVA es realizado. Se toma como caso de estudio la red de cola del ejemplo 2, descrito en la sección 13.1.2.

Se realiza una comparación entre las productividades asociadas al circuito A en función del número de camiones en los circuitos A y B, estimadas a partir del método lineal y por MVA. Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 13-13.

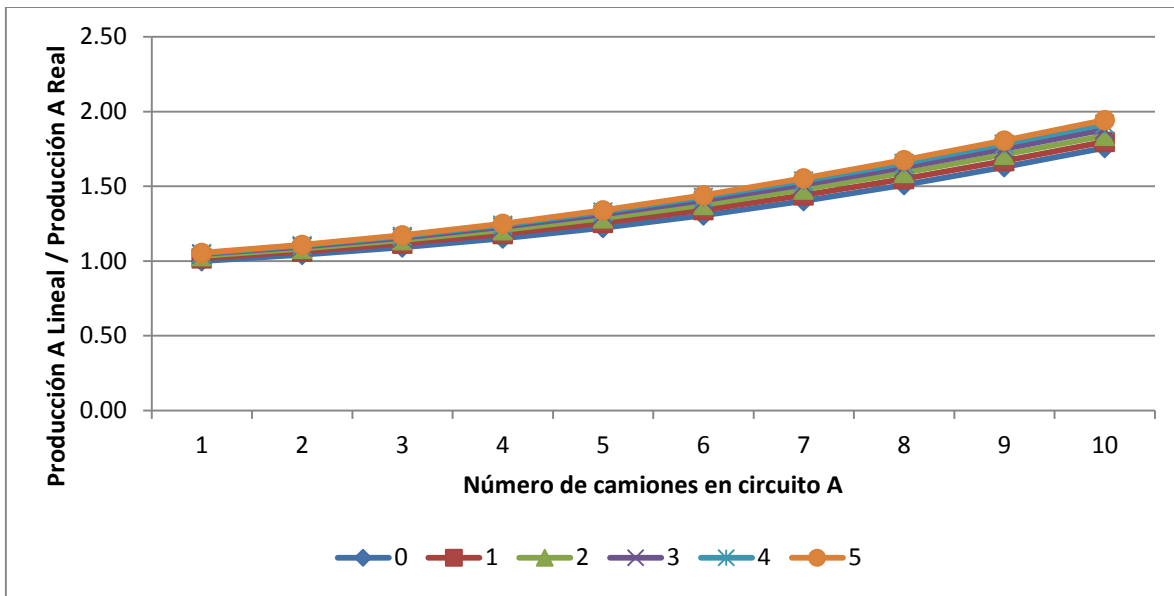


Gráfico 13-13: Cociente entre la producción lineal A y la producción A por MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B

La misma comparación se realiza entre las productividades asociadas al circuito B en función del número de camiones en los circuitos A y B, estimadas a partir del método lineal y por MVA. Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 13-14.

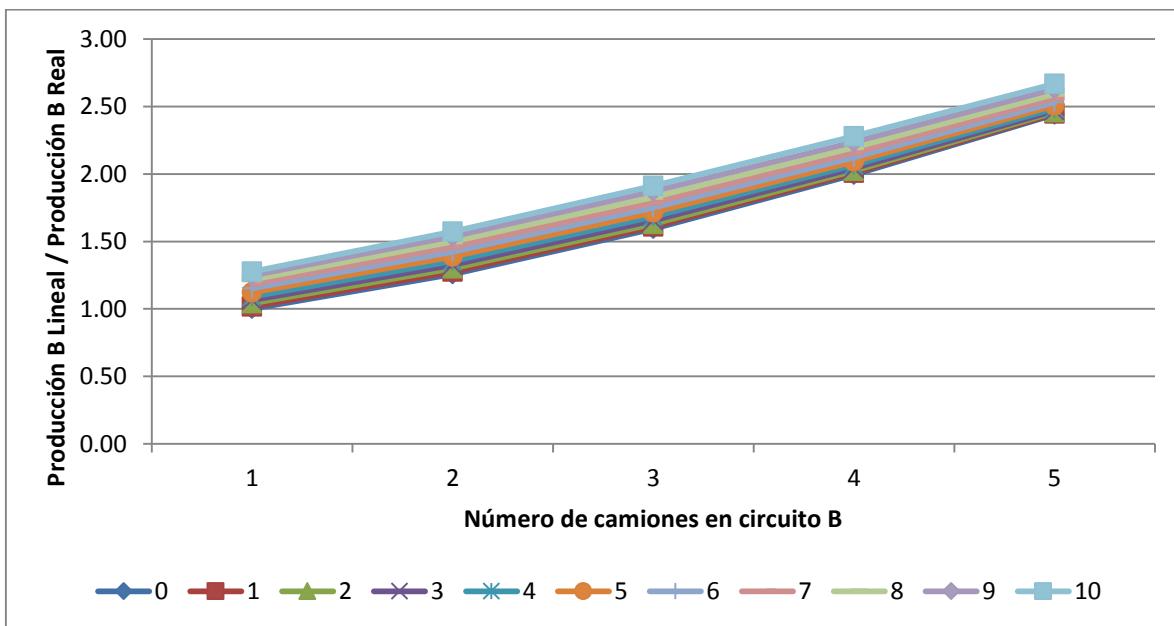


Gráfico 13-14: Cociente entre la producción B lineal y la producción B por MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B

Finalmente, se realiza entre las productividades totales en función del número de camiones en los circuitos A y B, estimadas a partir del método lineal y por MVA. Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 13-15.

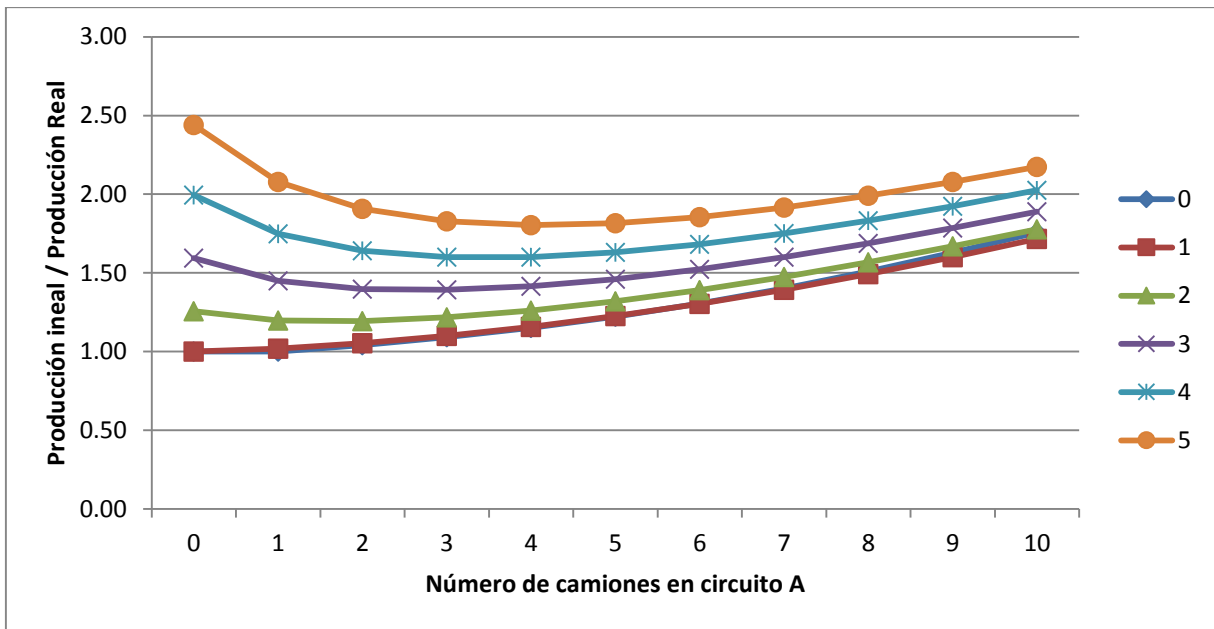


Gráfico 13-15: Cociente entre la producción total lineal y la producción total real MVA en función de número de camiones en los circuitos A y B

La principal conclusión de la comparación realizada es que existe un punto en donde la estimación por el método lineal es muy distinta de la hecha por el método MVA. Por lo tanto, el método lineal no es adecuado cuando las interferencias por espera en cola entre frentes de carga y descarga y la combinación de 1 o más circuitos de carga de material concurrentes a un mismo frente de descarga están presentes en el sistema de transporte de material a evaluar.

13.2 Problema de asignación de camiones a circuitos productivos

El siguiente problema de optimización lineal tiene por objetivo la asignación de camiones a circuitos productivos. Un circuito productivo se compone de un frente de carga (origen del material), un equipo de carga ubicado en la frente de carga y un frente de descarga (destino del material).

Conjuntos:

C	Conjunto de circuitos productivos del sistema.
D	Conjunto de los frentes de descarga del sistema.
C_d	Conjunto de todos los circuitos productivos que a d como frente de descarga.

Parámetros:

R_c	Rendimiento unitario de un camión en el circuito productivo c , en [t/h].
N_c	Número máximo de camiones a asignar en el circuito c .
E_c	Estado del circuito productivo c . Vale 1 si está en operación y 0 si no lo está.
N	Número máximo de camiones a asignar.
ρ_c	Mezcla del material transportado al destino del circuito c en base al total de material transportado al destino del circuito c .
M_d	Movimiento de material deseado al destino d .
η^-, η^+	Parámetro de holgura de mezcla de material al destino.
$\epsilon_d^+, \epsilon_d^-$	Parámetros de holgura de movimiento de material al destino d .

VARIABLES DE DECISIÓN:

y_c	Número de camiones a asignar para el circuito productivo c .
-------	--

Función objetivo:

Maximizar el movimiento de material total.

Restricciones:

1. El número de camiones asignado a circuito es un entero mayor o igual a cero.
2. El número de camiones asignado a un circuito debe ser menor al número de saturación de camiones en el circuito. Si el estado del circuito no está operativo, debe ser cero.
3. El número de camiones asignados a todos los circuitos productivos debe ser menor o igual al número de camiones disponibles.

4. El material transportado a un destino por un circuito productivo debe ser una fracción del total de material transportado a ese destino (con cierta tolerancia).
5. El material transportado para cada destino debe estar acotada superior e inferiormente.

El problema de asignación se plantea en la Figura 13-3.

$$\max \sum_{c \in C} R_c \cdot y_c$$

$$y_c \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall c \in C \quad (1)$$

$$y_c \leq N_c \cdot E_c \quad \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} y_c \leq N \quad (3)$$

$$(1 - \eta^-) \cdot \rho_c \cdot \sum_{c \in C_d} R_c \cdot y_c \leq R_c \cdot y_c \leq (1 + \eta^+) \cdot \rho_c \cdot \sum_{c \in C_d} R_c \cdot y_c \quad \forall d \in D, \forall c \in C_d \quad (4)$$

$$(1 - \epsilon_d^-) \cdot M_d \leq \sum_{c \in C_d} R_c \cdot y_c \leq (1 + \epsilon_d^+) \cdot M_d \quad \forall d \in D \quad (5)$$

Figura 13-3: Problema de asignación de camiones a circuitos productivos

13.3 Problema de asignación de equipos de carga a frentes de carga y camiones a circuitos productivos

Un problema similar es la asignación que no se restringe solamente de camiones a circuitos productivos, sino que a la asignación de equipos de carga a frentes de carga. Esta asignación de componentes mineros ocurre en forma integrada en el siguiente problema de optimización.

Conjuntos:

C	Conjunto de circuitos productivos del sistema.
D	Conjunto de los frentes de descarga del sistema.
EC	Conjunto de los equipos de carga en el sistema.

Parámetros:

R_c	Rendimiento unitario de un camión en el circuito productivo c , en [t/h].
N_c	Número máximo de camiones a asignar en el circuito c .

E_c^{ec}	Estado del equipo de carga asociado al circuito productivo c. Vale 1 si está en operación y 0 si no lo está.
E_c^{fc}	Estado del frente de carga asociado al circuito productivo c. Vale 1 si está en operación y 0 si no lo está.
E_c^{fd}	Estado del frente de descarga asociado al circuito productivo c. Vale 1 si está en operación y 0 si no lo está.
E_c^{ci}	Estado de la ruta asociado al circuito productivo c. Vale 1 si está en operación y 0 si no lo está.
N	Número máximo de camiones a asignar.
ρ_c	Mezcla del material transportado al destino del circuito c en base al total de material transportado al destino.
M_d	Movimiento de material deseado al destino d.
$\epsilon_d^+, \epsilon_d^-$	Parámetros de holgura de movimiento de material al destino d.

Variables de decisión:

x_c	Circuito productivo operativo (1) o no operativo (0).
y_c	Número de camiones a asignar para el circuito productivo c.

Función objetivo:

Maximizar el movimiento de material total.

Restricciones:

1. Cada circuito productivo es una variable binaria.
2. El número de camiones asignado a circuito es un entero mayor o igual a cero.
3. Si el estado del equipo de carga asociado al circuito productivo es no operativo, el circuito no puede operar.
4. Si el estado del frente de carga asociado al circuito productivo es no operativo, el circuito no puede operar.
5. Si el estado del frente de carga asociado al circuito productivo es no operativo, el circuito no puede operar.
6. Si el estado de los caminos circuito productivo está no operativo, el circuito no puede operar.
7. Un equipo de carga puede ser asignado a lo más a un circuito productivo en donde eventualmente se pueda asignar. Existen circuitos productivos en donde no se puede asignar un cierto tipo de equipo de carga.
8. El número de camiones asignados a todos los circuitos productivos debe ser menor o igual al número de camiones disponibles.
9. El material transportado para cada destino debe estar acotada superior e inferiormente.

10. Si el circuito productivo no está en operación, el número de camiones asignados al circuito es cero. Si el circuito productivo está en operación, el número de camiones asignados al circuito está acotado superiormente por el máximo número de camiones que soporta el circuito.

El problema de asignación se plantea en la Figura 13-4.

$$\max \sum_{c \in C} R_c \cdot y_c$$

$$x_c \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C \quad (1)$$

$$y_c \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall c \in C \quad (2)$$

$$x_c \leq E_c^{ec} \quad \forall c \in C \quad (3)$$

$$x_c \leq E_c^{fc} \quad \forall c \in C \quad (4)$$

$$x_c \leq E_c^{fd} \quad \forall c \in C \quad (5)$$

$$x_c \leq E_c^{ci} \quad \forall c \in C \quad (6)$$

$$\sum_{c \in C_{eq}} x_c \leq 1 \quad \forall eq \in EC \quad (7)$$

$$\sum_{c \in C} y_c \leq N \quad (8)$$

$$(1 - \epsilon_d^-) \cdot M_d \leq \sum_{c \in C_d} R_c \cdot y_c \leq (1 + \epsilon_d^+) \cdot M_d \quad \forall d \in D \quad (9)$$

$$y_c \leq N_c \cdot x_c \quad \forall c \in C \quad (10)$$

Figura 13-4: Problema de asignación de equipos de carga a frentes de carga y camiones a circuitos productivos

13.4 Porcentaje de tiempo en producción para camiones

A partir de datos reales, se obtiene el porcentaje del tiempo en producción de los equipos de transporte para los períodos considerados. Ver Tabla 13-3.

Período \ Turno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CE_01	81.7%	0.0%	14.7%	89.9%	100.0%	100.0%	79.5%	100.0%	88.1%	98.3%
CE_02	100.0%	79.4%	90.2%	95.0%	0.0%	0.8%	45.9%	62.2%	93.1%	99.2%
CE_03	99.3%	84.0%	90.7%	93.9%	98.4%	97.0%	50.5%	94.8%	100.0%	77.9%
CE_04	1.0%	0.0%	0.0%	93.8%	100.0%	72.8%	99.9%	100.0%	85.8%	87.1%
CE_05	100.0%	73.6%	75.7%	100.0%	100.0%	59.5%	93.4%	100.0%	25.1%	89.9%
CE_06	0.0%	24.7%	99.9%	100.0%	100.0%	85.1%	99.9%	94.7%	100.0%	99.9%
CE_07	0.0%	0.0%	0.0%	74.6%	79.2%	0.0%	75.1%	95.4%	69.7%	87.7%
CE_08	65.3%	80.9%	99.9%	62.4%	100.0%	100.0%	90.2%	0.0%	0.0%	0.0%
CE_09	0.0%	35.8%	61.8%	98.6%	80.1%	70.9%	44.9%	99.3%	78.1%	93.7%
CE_10	100.0%	75.8%	70.6%	100.0%	98.5%	90.1%	97.2%	100.0%	87.2%	98.8%
CE_11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
CE_12	94.5%	72.2%	74.6%	94.3%	64.4%	100.0%	99.9%	68.7%	86.6%	97.1%
CE_13	100.0%	79.2%	72.6%	67.8%	100.0%	86.5%	99.9%	98.4%	83.8%	76.5%
CE_14	100.0%	75.8%	70.8%	100.0%	100.0%	100.0%	2.8%	6.1%	100.0%	86.4%
CE_15	77.2%	72.9%	74.8%	99.5%	100.0%	100.0%	99.9%	100.0%	100.0%	88.3%
CE_16	63.3%	70.9%	0.0%	0.0%	0.0%	93.1%	80.5%	95.5%	83.5%	85.0%
CE_17	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
CE_18	100.0%	71.5%	60.2%	84.5%	99.0%	100.0%	86.4%	100.0%	90.6%	0.0%

Tabla 13-3: % Tiempo en producción equipos de transporte

13.5 Porcentaje de tiempo en producción para equipos de carga

A partir de datos reales, se obtiene el porcentaje del tiempo en producción de los equipos de carga para los períodos considerados. Ver Gráfico 13-16.

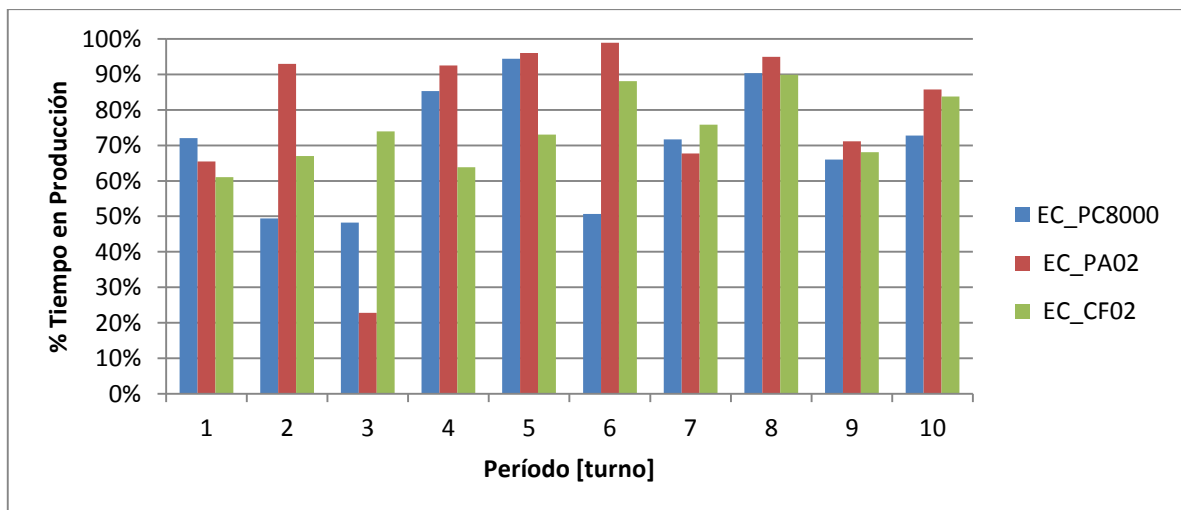


Gráfico 13-16: % Tiempo en producción equipos de carga

13.6 Análisis estadístico de las variables operacionales

Se realiza el ajuste para las siguientes variables operacionales, las cuales de describen en la Tabla 13-4.

Variable	Descripción
Factor de carga	Cantidad de material que el equipo de carguío carga en el camión.
Tiempo de carga	Tiempo entre que el equipo de carguío se demora en cargar el camión. No incluye tiempos de acuatamiento ni esperas una vez posicionado el camión.
Tiempo de acuatamiento carga	Tiempo que le toma al camión desde que entra a la locación de carga hasta posicionarse en el punto de carga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
Tiempo de descarga	Tiempo que toma el camión en descargar su carga actual. No incluye tiempos de acuatamiento en descarga.
Tiempo de acuatamiento descarga	Tiempo que le toma al camión desde que entra a la locación de descarga hasta posicionarse en el punto de descarga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
Tiempo de viaje	Tiempo de viaje entre locaciones de carga y descarga. Se distingue entre tiempos de viaje en estado cargado y descargado.
Velocidad aislada camión	Velocidad del camión en ausencia de equipos en las proximidades. La velocidad depende del estado del camión y la pendiente por al cual recorre el tramo.

Tabla 13-4: Descripción de parámetros operacionales

La metodología usada fue:

1. Análisis estadístico de datos
2. Eliminación de datos anómalos
3. Ajuste de distribución de los datos de la variable aleatoria en estudio.

A continuación se reportan una serie de estadísticas básicas con origen en los datos recolectados en la visita, a excepción de los tiempos de viaje. En la sección siguiente se reportan las distribuciones ajustadas para cada una de las variables consideradas

13.6.1 Factor de carga

Estadístico	PA_MINA	PC_MINA	CF_MINA	CF_STOCK
Media [t]	266.4	276.0	277.1	262.1
Desviación estándar [t]	29.5	25.3	28.1	28.3

Varianza de la muestra [t^2]	872.5	640.2	790.4	802.3
Rango [t]	353.2	119.6	172.9	329.5
Mínimo [t]	0	200.3	180.7	0
Máximo [t]	353.2	319.9	353.6	329.5
Cuenta (# de datos)	7559	3800	568	2441

Tabla 13-5: Estadísticas básicas Factor de Carga

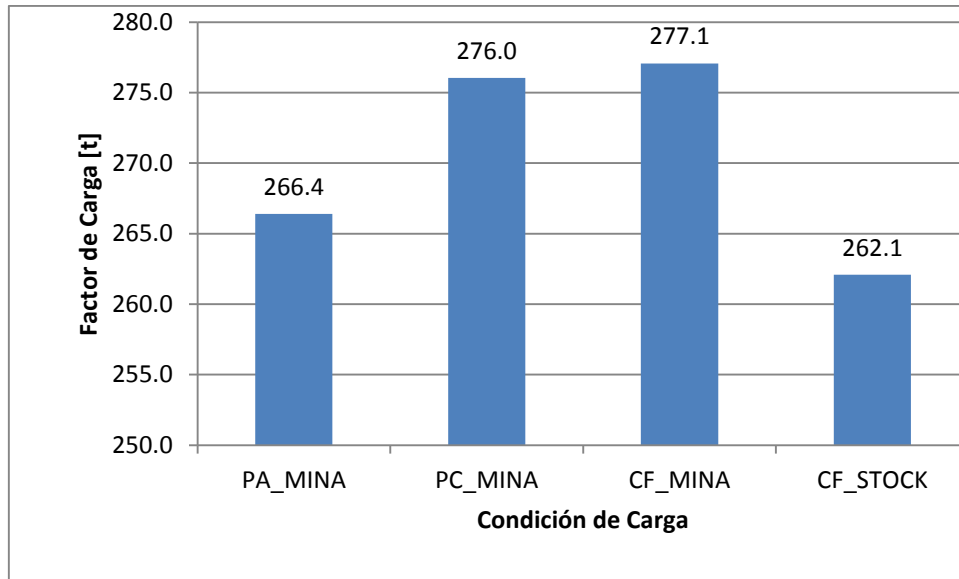


Gráfico 13-17: Media de Factor de Carga en función de la condición de carga

13.6.2 Tiempo de carga

Estadístico	PA_MINA	PC_MINA	CF_MINA	CF_STOCK
Media [<i>min</i>]	1.78	2.21	6.69	6.14
Mediana [<i>min</i>]	1.69	2.11	6.73	6.04
Moda [<i>min</i>]	1.70	2.00	6.28	6.26
Desviación estándar [<i>min</i>]	0.47	0.47	1.05	1.07
Varianza de la muestra [<i>min</i> ²]	0.23	0.22	1.10	1.15
Rango [<i>min</i>]	3.13	2.94	4.81	8.48
Mínimo [<i>min</i>]	0.37	1.06	4.17	0.50
Máximo [<i>min</i>]	3.50	4.00	8.98	8.99
Cuenta (# de datos)	7326	3853	568	2441

Tabla 13-6: Estadísticas básicas Tiempo de Carga

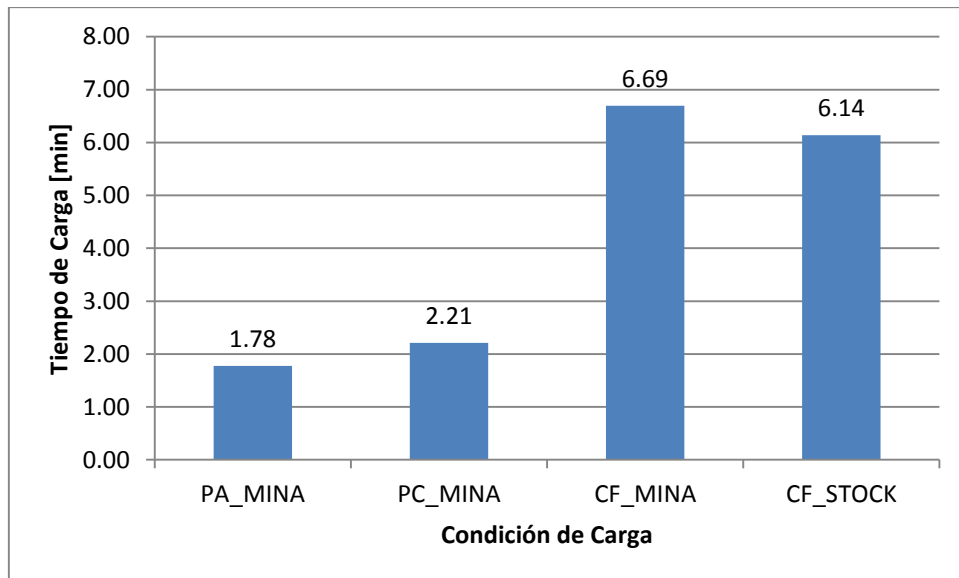


Gráfico 13-18: Media de Tiempo de Carga en función de la condición de carga

13.6.3 Tiempo de aculatamiento en carga

Estadístico	PA_MINA	PC_MINA	CF_MINA	CF_STOCK
Media [<i>min</i>]	1.62	1.56	1.57	1.32
Mediana [<i>min</i>]	1.51	1.46	1.48	1.25
Moda [<i>min</i>]	1.29	1.21	1.17	1.07
Desviación estándar [<i>min</i>]	0.52	0.46	0.47	0.34
Varianza de la muestra [<i>min</i> ²]	0.27	0.21	0.22	0.12
Rango [<i>min</i>]	3.49	3.31	2.88	3.19
Mínimo [<i>min</i>]	0.51	0.68	0.71	0.49
Máximo [<i>min</i>]	3.99	3.99	3.58	3.68
Cuenta (# de datos)	7559	3940	568	2441

Tabla 13-7: Estadísticas básicas Tiempo de Aculatamiento Carga

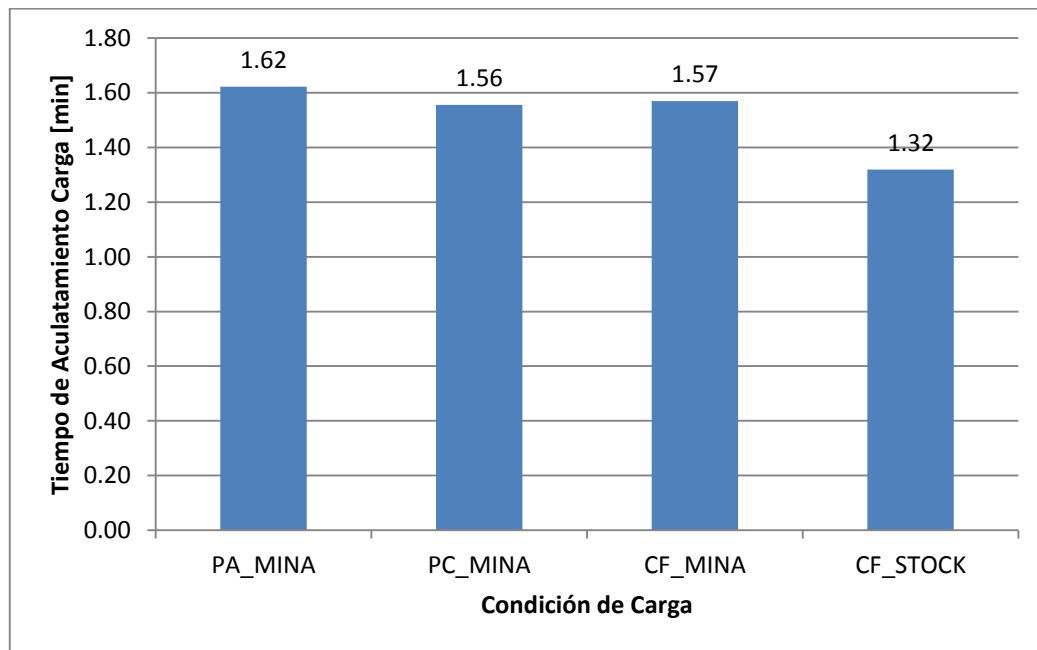


Gráfico 13-19: Media de Tiempo de Aculatamiento Carga en función de la condición de carga

13.6.4 Tiempo de descarga

Estadístico	<i>Botadero Intermedio</i>	<i>Botadero Oeste</i>	<i>Stock Genérico</i>	<i>Chancador</i>
Media [<i>min</i>]	1.34	1.43	1.27	0.89
Mediana [<i>min</i>]	1.33	1.41	1.26	0.87
Moda [<i>min</i>]	1.29	1.44	1.28	0.85
Desviación estándar [<i>min</i>]	0.07	0.10	0.14	0.13
Varianza de la muestra [<i>min</i> ²]	0.00	0.01	0.02	0.02
Rango [<i>min</i>]	0.57	0.86	1.83	2.49
Mínimo [<i>min</i>]	1.23	1.31	0.57	0.51
Máximo [<i>min</i>]	1.80	2.17	2.40	3.00
Cuenta (# de datos)	907	109	2736	8000

Tabla 13-8: Estadísticas básicas Tiempo de Descarga

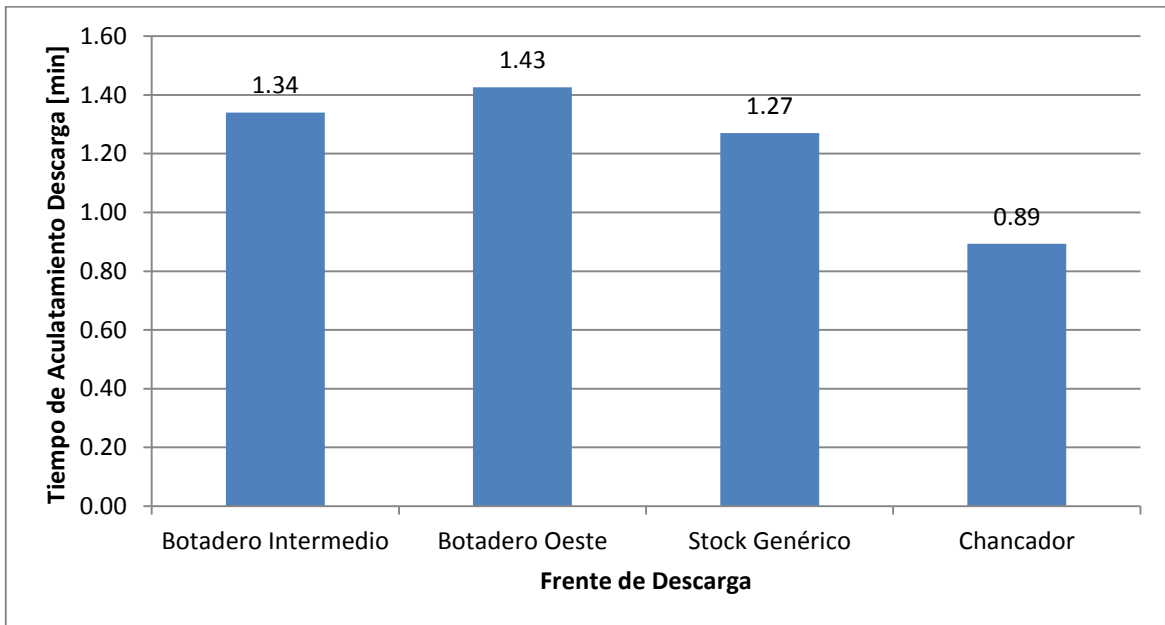


Gráfico 13-20: Media de Tiempo de Descarga en función de la frente de descarga

13.6.5 Tiempo de aculatamiento en descarga

Estadístico	<i>Botadero Intermedio</i>	<i>Botadero Oeste</i>	<i>Stock Genérico</i>	<i>Chancador</i>
Media [<i>min</i>]	1.69	2.09	1.18	1.19
Mediana [<i>min</i>]	1.67	2.08	1.12	1.05
Moda [<i>min</i>]	1.83	2.11	1.12	0.74
Desviación estándar [<i>min</i>]	0.28	0.22	0.27	0.40
Varianza de la muestra [<i>min</i> ²]	0.08	0.05	0.07	0.16
Rango [<i>min</i>]	1.71	1.24	2.11	2.55
Mínimo [<i>min</i>]	1.21	1.66	0.68	0.43
Máximo [<i>min</i>]	2.92	2.90	2.79	2.98
Cuenta (# de datos)	951	109	2745	10117

Tabla 13-9: Estadísticas básicas Tiempo de Aculatamiento Descarga

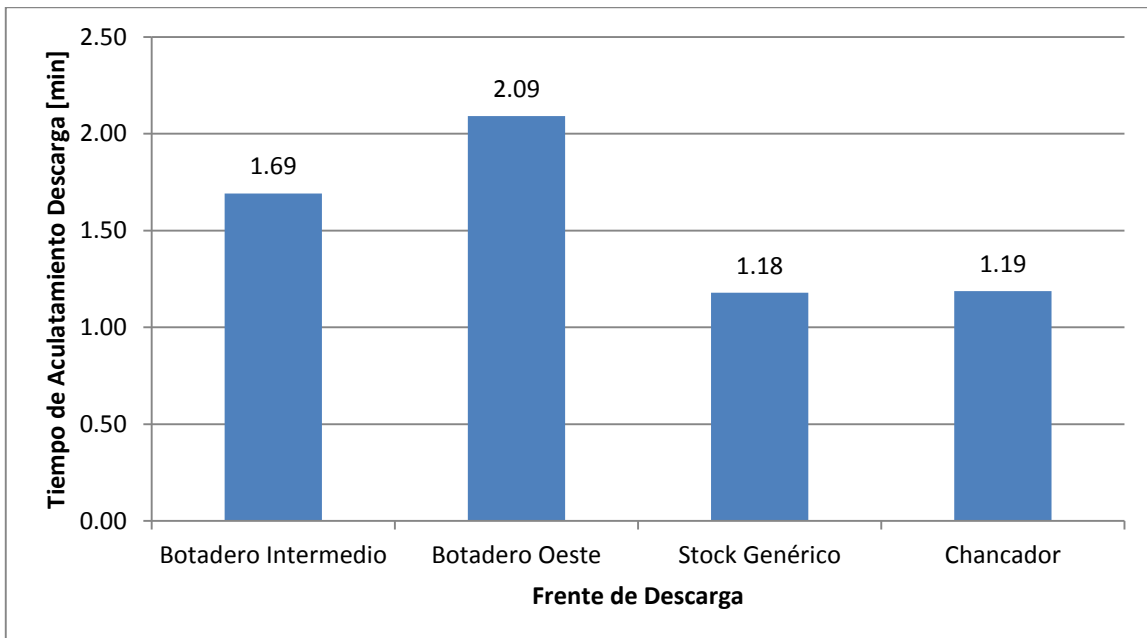


Gráfico 13-21: Media de Tiempo de Descarga en función de la frente de descarga

13.6.6 Tiempos de viaje

13.6.6.1 Ruta mina a chancador

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	13.72	7.73	2.74	1.60	0.51	0.24
Mediana	13.71	7.54	1.39	0.50	0.00	0.00
Moda	13.11	#N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.50	1.63	3.44	2.65	1.09	0.72
Varianza de la muestra	2.24	2.65	11.82	7.05	1.18	0.52
Rango	15.47	16.99	18.21	14.27	5.63	3.63
Mínimo	2.30	5.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	17.77	22.15	18.21	14.27	5.63	3.63
Cuenta	201	201	201	201	201	201

Tabla 13-10: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2505 a Chancador

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	14.16	8.26	1.90	1.34	0.39	0.16
Mediana	14.06	8.02	0.83	0.45	0.00	0.00
Moda	14.52	7.64	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.34	1.99	2.78	2.33	0.95	0.61
Varianza de la muestra	1.79	3.96	7.73	5.41	0.91	0.37
Rango	19.43	24.50	19.92	19.68	5.98	5.97
Mínimo	4.51	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	23.95	24.99	19.92	19.68	5.98	5.97
Cuenta	5470	5470	5470	5470	5470	5470

Tabla 13-11: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2520 a Chancador

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	14.10	8.16	2.45	1.62	0.40	0.18
Mediana	13.91	8.10	1.06	0.54	0.00	0.00
Moda	13.75	7.34	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.46	2.75	3.38	2.71	0.97	0.64
Varianza de la muestra	2.12	7.58	11.42	7.32	0.95	0.41
Rango	22.24	24.53	19.91	18.73	5.90	5.77
Mínimo	2.75	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	24.99	24.91	19.91	18.73	5.90	5.77
Cuenta	1796	1796	1796	1796	1796	1796

Tabla 13-12: Estadísticas básicas Ruta MINA_F5_2535 a Chancador

13.6.6.2 Ruta mina a botaderos

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	16.12	8.11	1.98	1.58	0.42	0.12
Mediana	16.06	8.01	0.84	0.59	0.00	0.00
Moda	15.71	7.53	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.38	2.59	3.01	2.57	0.98	0.48
Varianza de la muestra	1.90	6.69	9.04	6.61	0.96	0.23
Rango	13.76	22.74	19.47	16.64	5.79	5.36
Mínimo	10.53	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	24.29	23.29	19.47	16.64	5.79	5.36

Tabla 13-13: Ruta Mina_F5_2520 Botadero Intermedio

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	15.85	8.26	2.26	1.81	0.54	0.15
Mediana	15.70	7.93	0.95	0.81	0.00	0.00
Moda	14.46	7.99	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.57	2.73	3.04	2.81	1.18	0.50
Varianza de la muestra	2.46	7.44	9.26	7.88	1.40	0.25
Rango	17.08	23.83	19.47	19.83	5.85	3.92
Mínimo	7.36	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	24.44	24.22	19.47	19.83	5.85	3.92

Tabla 13-14: Ruta Mina_F5_2535 Botadero Intermedio

Estadístico	Tiempo de Viaje Descargado	Tiempo de Viaje Cargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	4.38	6.25	0.52	0.50	0.16	0.09
Mediana	4.02	6.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Moda	3.75	6.62	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.79	0.73	1.31	1.45	0.71	0.53
Varianza de la muestra	3.19	0.53	1.71	2.10	0.50	0.28
Rango	18.15	4.43	10.74	12.82	5.74	5.49
Mínimo	0.92	4.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	19.07	8.53	10.74	12.82	5.74	5.49

Tabla 13-15: Ruta Mina_F6_2595 Botadero Oeste

13.6.6.3 Rutas mina a stocks

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	14.75	7.87	3.17	1.63	0.30	0.11
Mediana	14.51	7.69	2.13	0.60	0.00	0.00
Moda	#N/A	8.93	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.28	2.02	3.51	2.85	0.82	0.51
Varianza de la muestra	1.64	4.09	12.30	8.12	0.67	0.26
Rango	7.82	13.00	17.86	19.08	5.79	4.62
Mínimo	11.92	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	19.75	13.66	17.86	19.08	5.79	4.62
Cuenta	186	186	186	186	186	186

Tabla 13-16: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2505 a Stock 1

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	15.27	8.35	2.44	1.56	0.39	0.19
Mediana	15.14	8.14	1.21	0.52	0.00	0.00
Moda	14.59	7.27	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.44	2.21	3.23	2.65	0.93	0.68
Varianza de la muestra	2.08	4.90	10.46	7.04	0.86	0.47
Rango	12.36	24.15	18.98	17.63	5.24	5.09
Mínimo	12.26	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	24.62	24.60	18.98	17.63	5.24	5.09
Cuenta	439	439	439	439	439	439

Tabla 13-17: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2520 a Stock 1

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	15.15	8.17	3.51	1.61	0.53	0.12
Mediana	14.96	8.08	2.48	0.59	0.00	0.00
Moda	15.90	#N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.53	2.32	3.99	2.55	1.05	0.45
Varianza de la muestra	2.33	5.36	15.89	6.48	1.10	0.21
Rango	8.77	15.42	17.23	14.62	4.77	3.33
Mínimo	12.06	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	20.83	16.18	17.23	14.62	4.77	3.33
Cuenta	130	130	130	130	130	130

Tabla 13-18: Estadísticas básicas Ruta Mina_F5_2535 a Stock 1

13.6.6.4 Ruta chancador a stocks

Estadístico	Tiempo de Viaje Cargado	Tiempo de Viaje Descargado	Delay Viaje Cargado	Delay Viaje Descargado	Error Viaje Cargado	Error Viaje Descargado
Media	2.11	2.18	0.27	0.29	0.05	0.04
Mediana	2.08	1.94	0.18	0.00	0.00	0.00
Moda	2.17	1.69	0.00	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	0.64	1.34	0.51	1.07	0.29	0.27
Varianza de la muestra	0.41	1.79	0.26	1.15	0.08	0.07
Rango	13.73	19.84	6.79	13.03	3.44	4.12
Mínimo	1.09	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	14.81	20.37	6.79	13.03	3.44	4.12
Cuenta	854	854	854	854	854	854

Tabla 13-19: Ruta Stock 01 a Chancador

13.7 Histogramas de distribuciones de parámetros operacionales

Los histogramas experimentales y las distribuciones de probabilidades ajustadas para cada una de los parámetros operacionales se muestran en las siguientes secciones.

13.7.1 Factor de carga

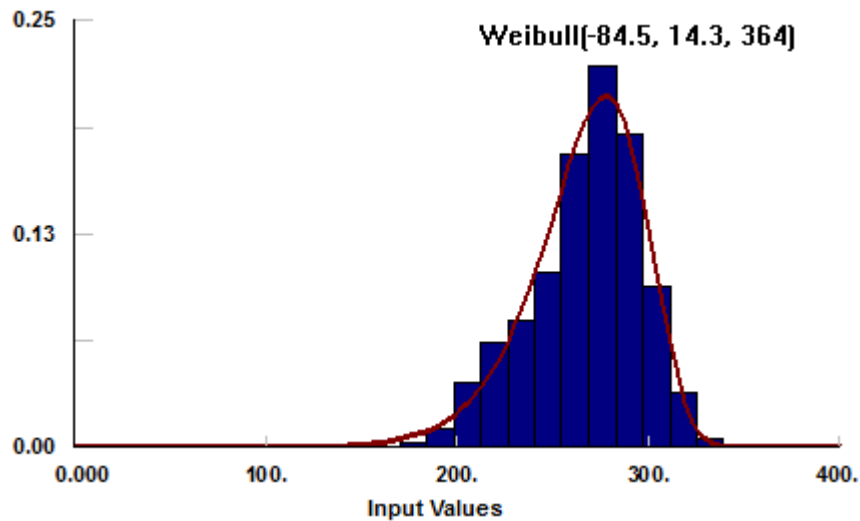


Gráfico 13-22: PA_MINA

Fitted Density

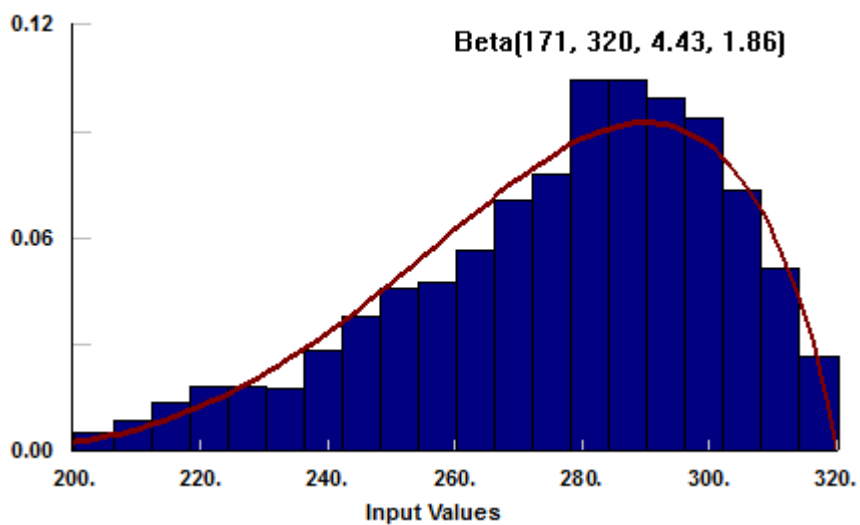


Gráfico 13-23: PC_MINA

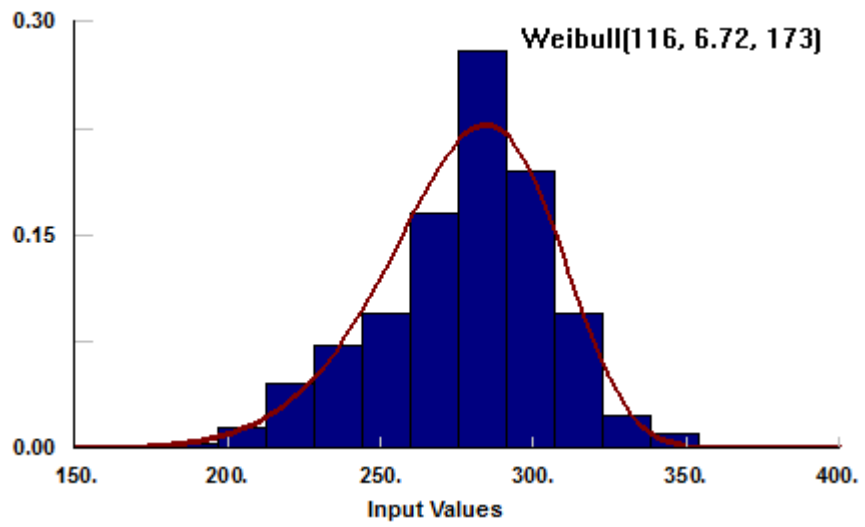


Gráfico 13-24: CF_MINA

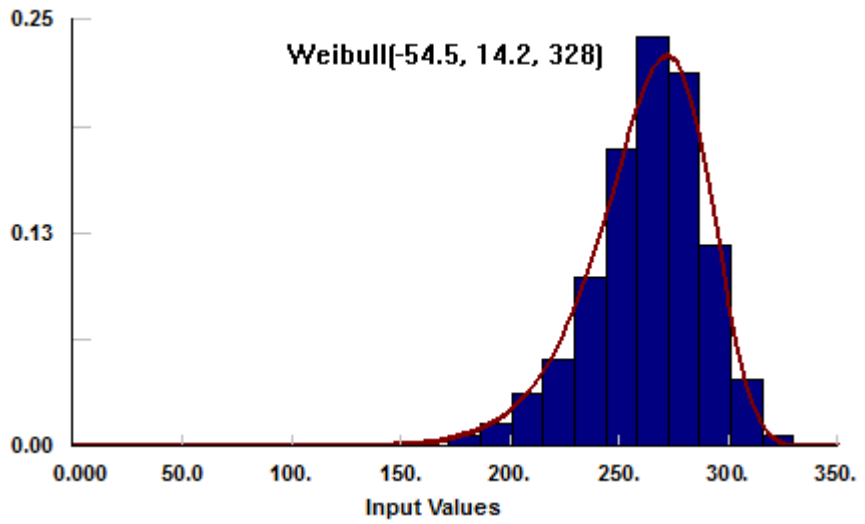


Gráfico 13-25: CF_STOCK

13.7.2 Tiempo de carga

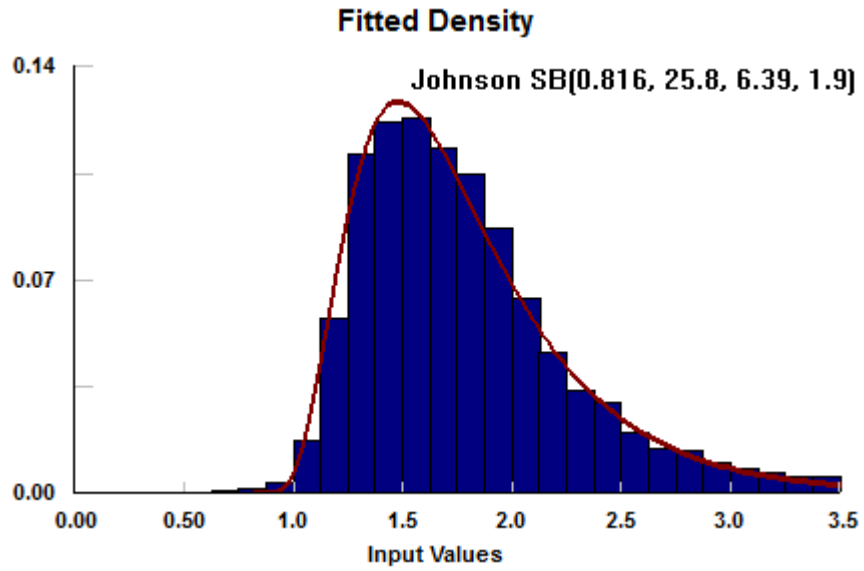


Gráfico 13-26: PA_MINA

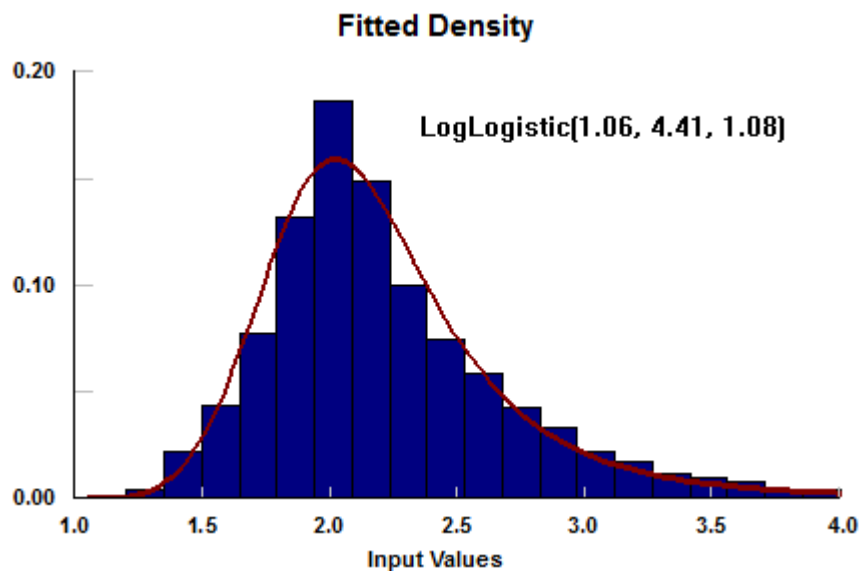


Gráfico 13-27: PC_MINA

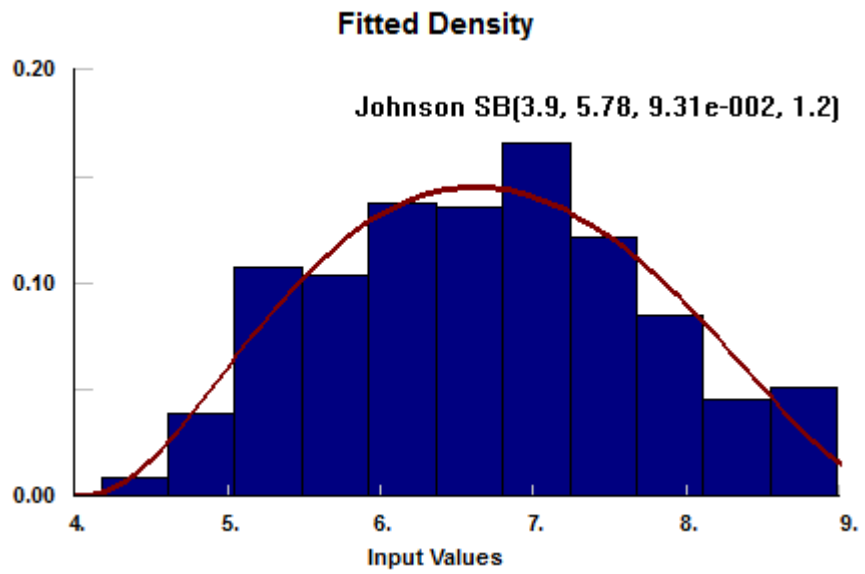


Gráfico 13-28: CF_MINA

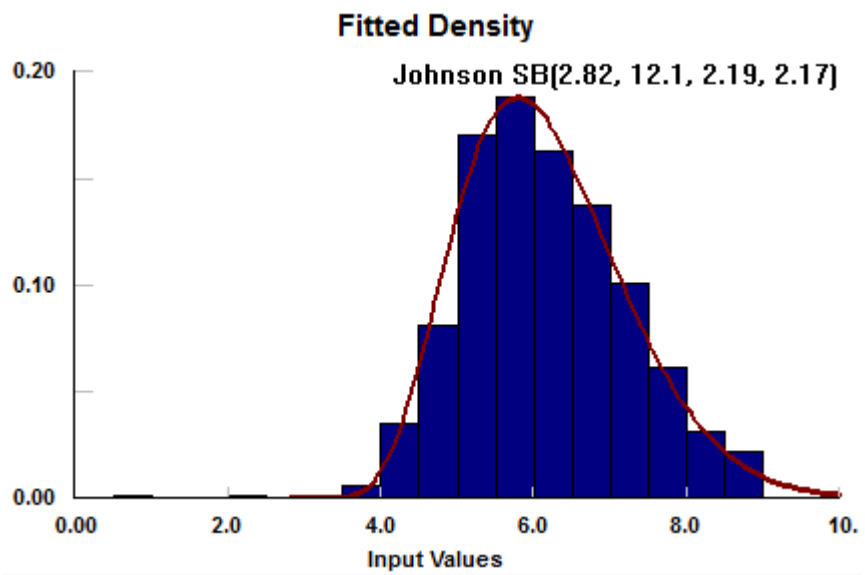


Gráfico 13-29: CF_STOCK

13.7.3 Tiempo de aculatamiento en carga

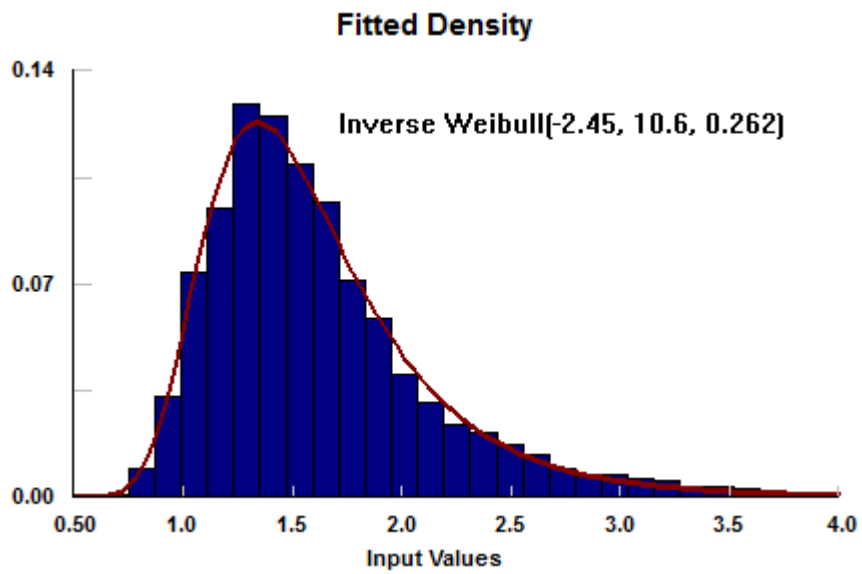


Gráfico 13-30: PA_MINA

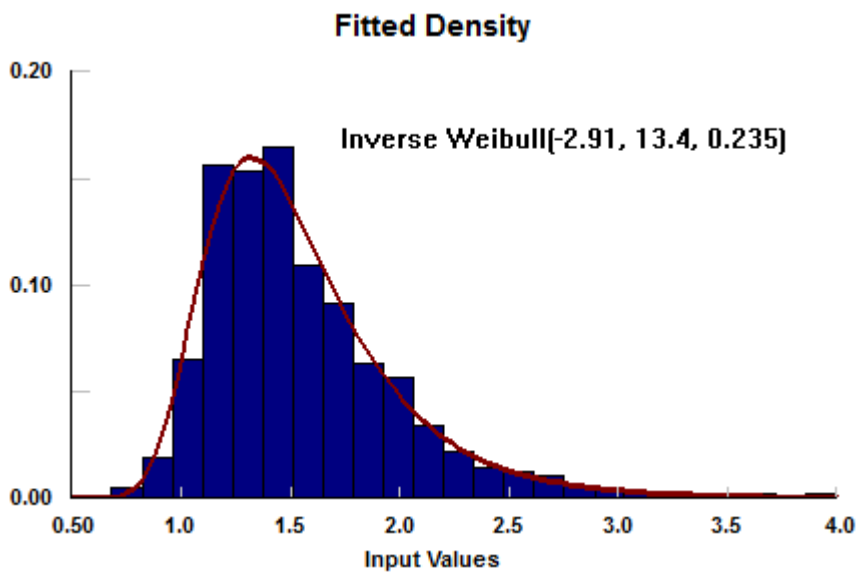


Gráfico 13-31: PC_MINA

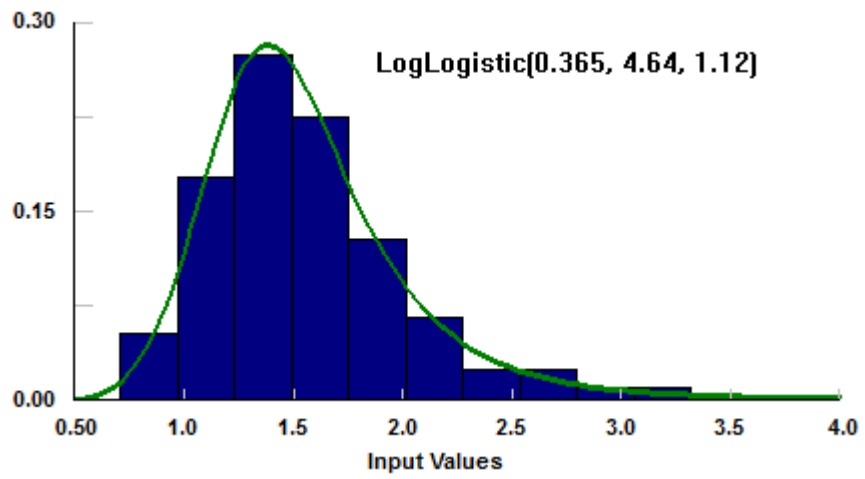


Gráfico 13-32: CF_MINA

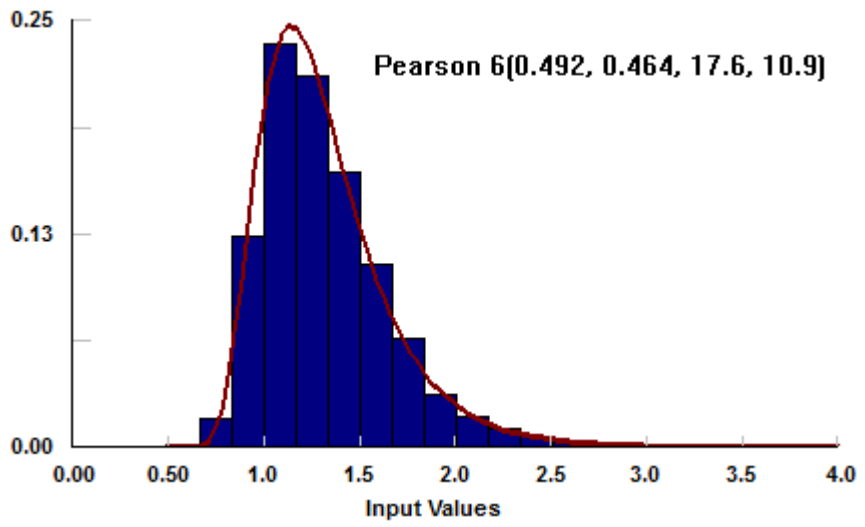


Gráfico 13-33: CF_STOCK

13.7.4 Tiempo de descarga

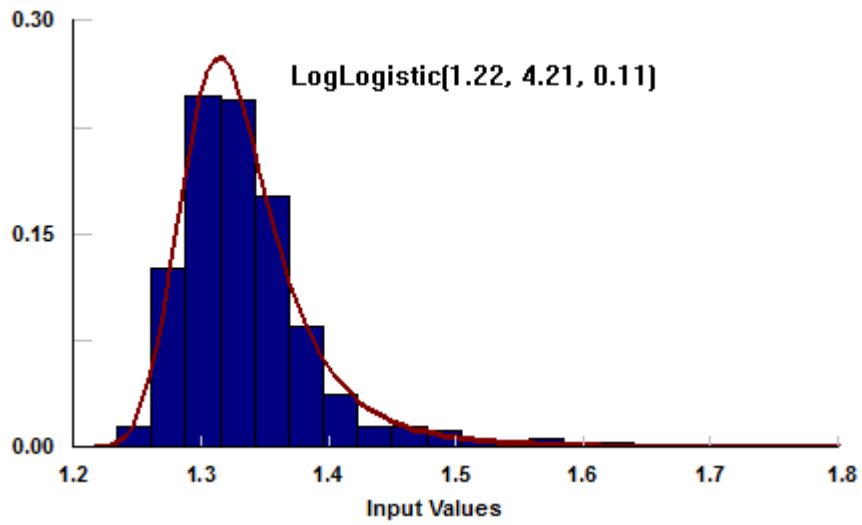


Gráfico 13-34: Botadero Intermedio

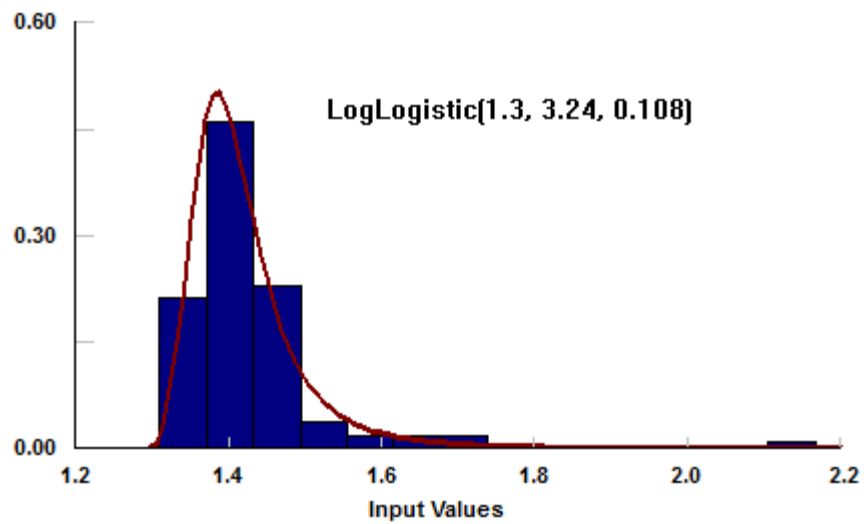


Gráfico 13-35: Botadero Oeste

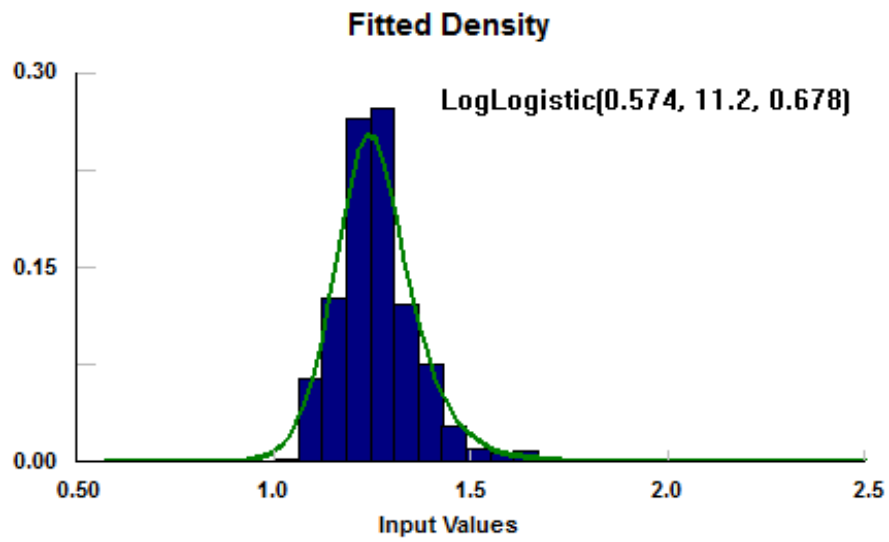


Gráfico 13-36: Stock Genérico

13.7.5 Tiempo de aculatamiento en descarga

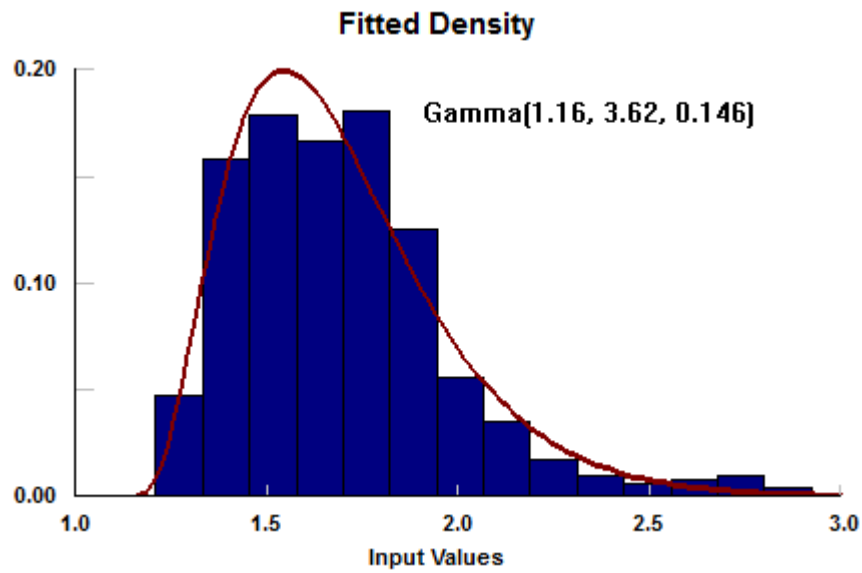


Gráfico 13-37: Botadero Intermedio

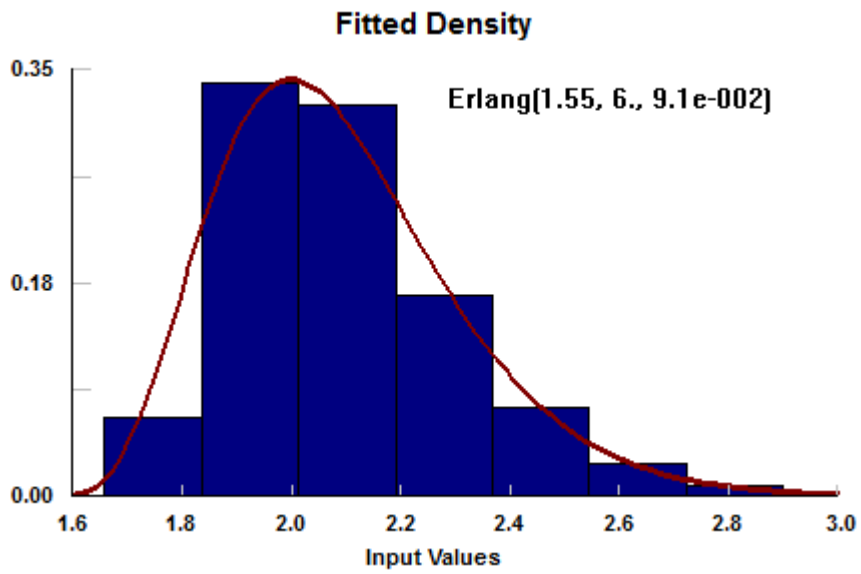


Gráfico 13-38: Botadero Oeste

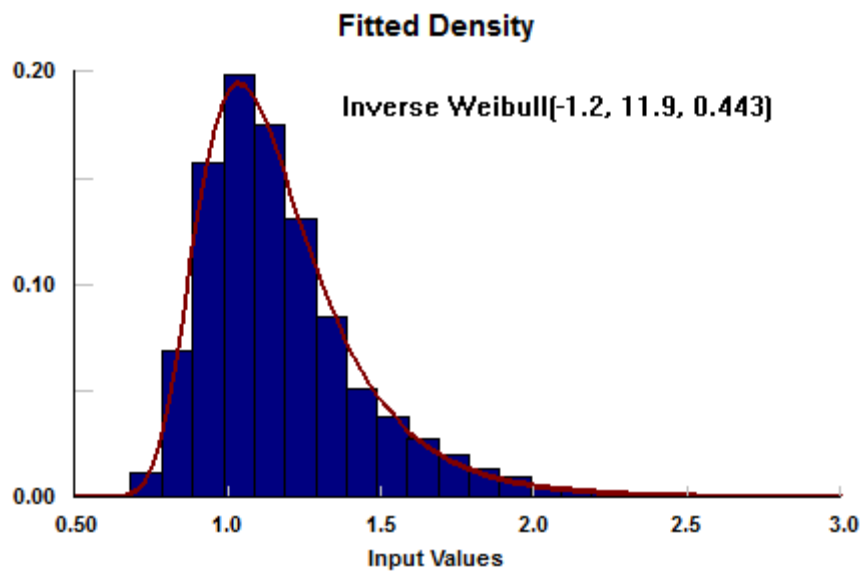


Gráfico 13-39: Stock Genérico

13.8 Especificación de parámetros de distribuciones

De acuerdo en el orden en que se especifican los parámetros de las distribuciones en la tabla resumen de distribuciones, se tiene la correspondencia entre los parámetros especificados según el nombre de la distribución.

13.8.1 Beta

Beta Distribution (*min, max, p, q*)

$$f(x) = \frac{1}{B(p,q)} \frac{(x - \min)^{p-1} (\max - x)^{q-1}}{(\max - \min)^{p+q-1}}$$

$\min \leq x \leq \max$

\min = minimum value of x

\max = maximum value of x

p = lower shape parameter > 0

q = upper shape parameter > 0

$B(p,q)$ Beta Function

13.8.2 Erlang

Erlang Distribution (*min, m, beta*)

$$f(x) = \frac{(x - \min)^{m-1}}{\beta^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{[x - \min]}{\beta}\right)$$

\min = minimum x

m = shape factor = positive integer

β = scale factor > 0

13.8.3 Gamma

Gamma Distribution (*min, alpha, beta*)

$$f(x) = \frac{(x - \min)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{[x - \min]}{\beta}\right)$$

\min = minimum x

α = shape parameter > 0

β = scale parameter > 0

13.8.4 Inverse Weibull

Inverse Weibull Distribution (*min, alpha, beta*)

$$f(x) = \alpha\beta \left(\frac{1}{\beta(x - \min)} \right)^{\alpha+1} \exp \left(- \left(\frac{1}{\beta(x - \min)} \right)^\alpha \right)$$

min = minimum x

α = shape parameter > 0

β = mixture of shape and scale > 0

13.8.5 Johnson SB

Johnson SB Distribution (*min, lambda, gamma, delta*)

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi y(1-y)\lambda}} \exp \left(-1/2 \left(\gamma + \delta \ln \left(\frac{y}{1-y} \right) \right)^2 \right)$$

where

$$y = \frac{x - \min}{\lambda}$$

min = minimum value of x

λ = range of x above the minimum

γ = skewness parameter

δ = shape parameter > 0

13.8.6 Log-Logistic

Log-Logistic Distribution (*min, p, beta*)

$$f(x) = \frac{p \left(\frac{x - \min}{\beta} \right)^{p-1}}{\beta \left[1 + \left(\frac{x - \min}{\beta} \right)^p \right]^2}$$

min = minimum x

p = shape parameter > 0

β = scale parameter > 0

13.8.7 Pearson6

Pearson 6 Distribution (*min, beta, p, q*)

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x - \min}{\beta}\right)^{p-1}}{\beta \left[1 + \left(\frac{x - \min}{\beta}\right)\right]^{p+q} B(p, q)}$$

$$\begin{aligned}x &> \min \\ \min &\in (-\infty, \infty) \\ \beta &> 0 \\ p &> 0 \\ q &> 0\end{aligned}$$

13.8.8 Weibull

Weibull Distribution (*min, alpha, beta*)

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \min}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{[x - \min]}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

$$\begin{aligned}\min &= \text{minimum } x \\ \alpha &= \text{shape parameter } > 0 \\ \beta &= \text{scale parameter } > 0\end{aligned}$$

13.9 Calibración Turno 2014-04-21-D

A continuación se presenta los resultados de calibración del turno 2014-04-21-D. Las variables de calibración fueron la cantidad de material descargado, el número de descargas y el factor de carga medio.

13.9.1 Comparación material descargado

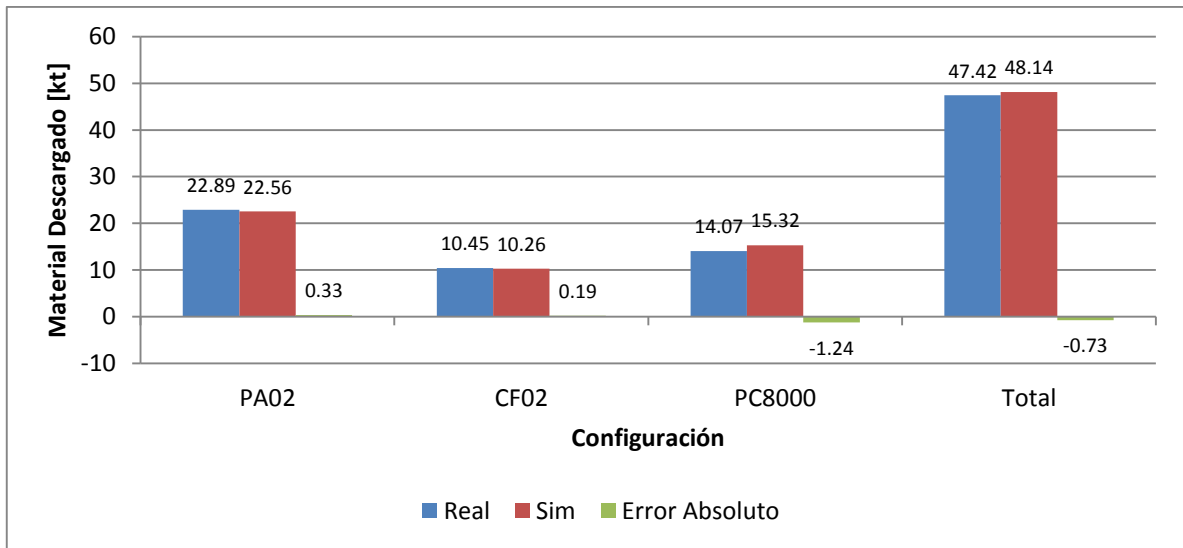


Gráfico 13-40: Material Descargado. Real vs Sim

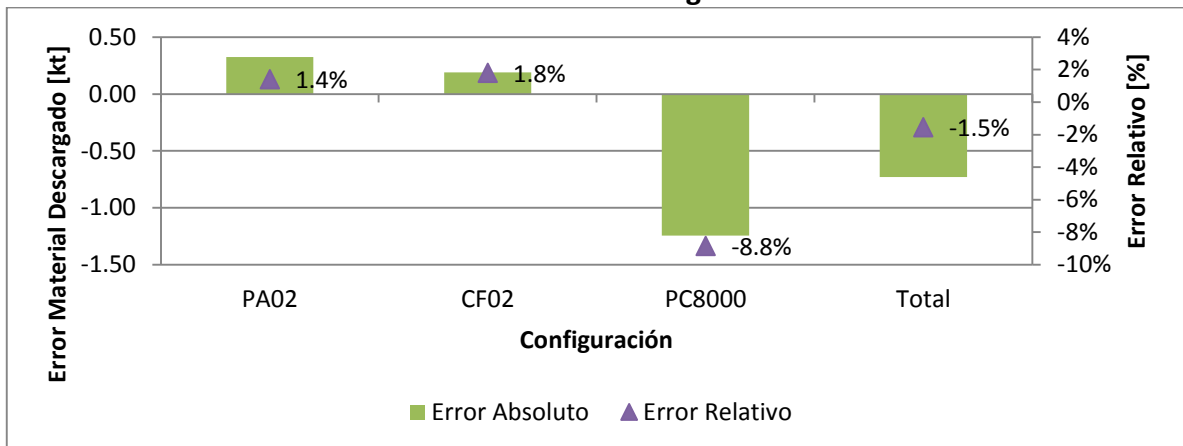


Gráfico 13-41: Errores Material Descargado. Real vs Sim

13.9.2 Comparación número de descargas

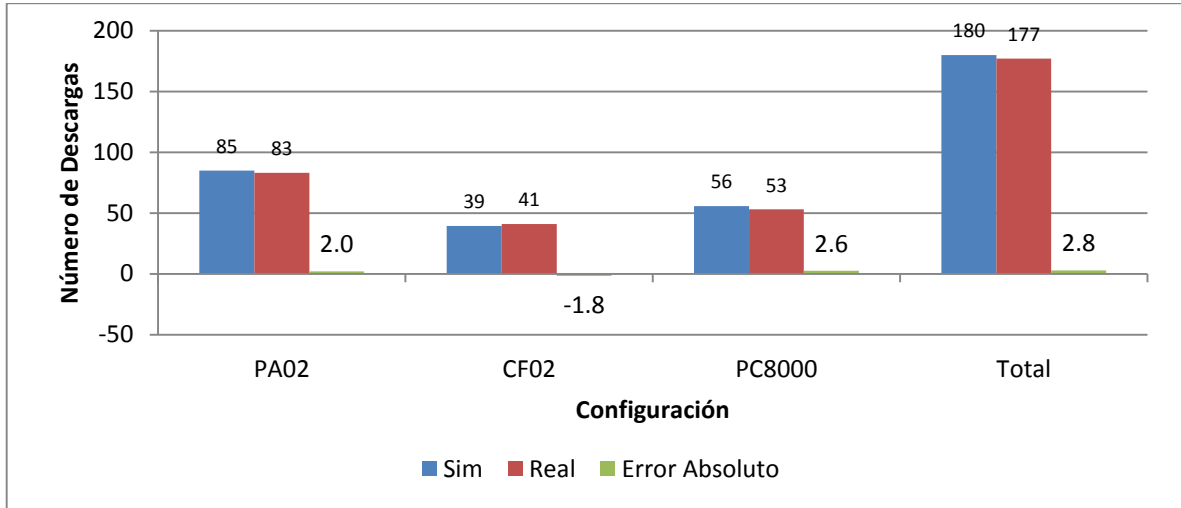


Gráfico 13-42: Número de Descargas. Real vs Sim

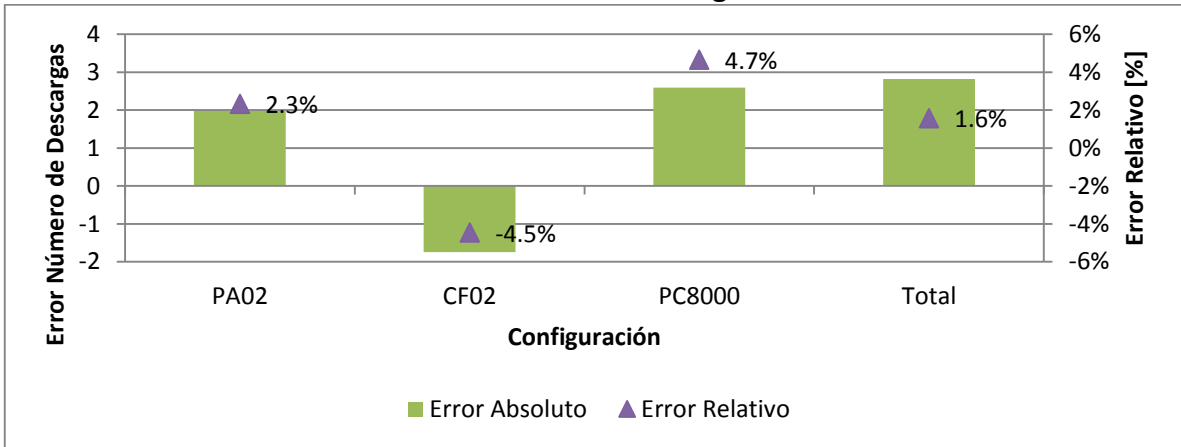


Gráfico 13-43: Errores Número de Descargas. Real vs Sim

13.9.3 Comparación factor de carga

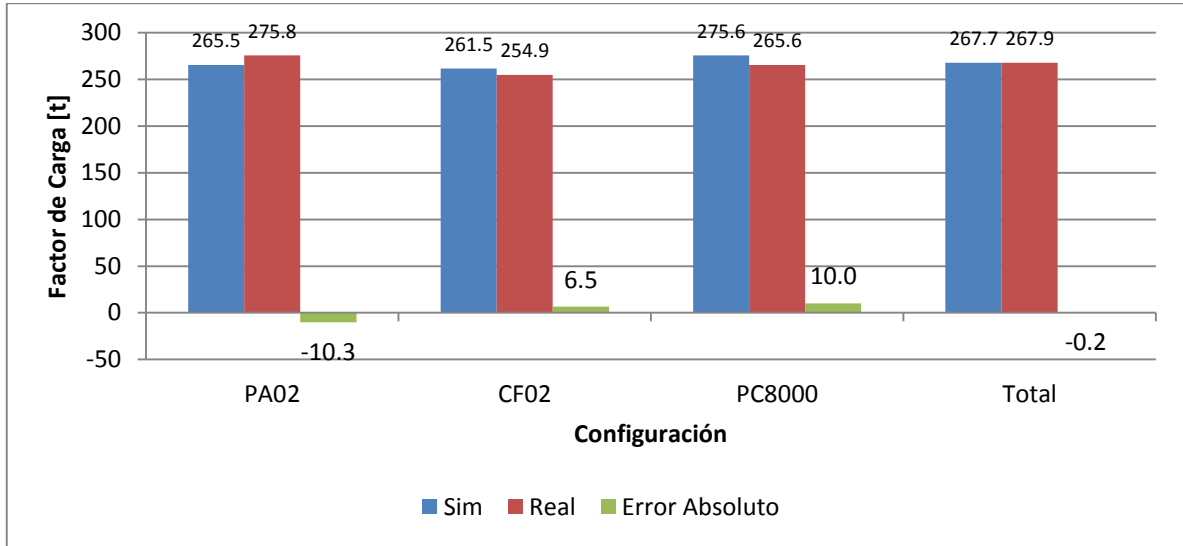


Gráfico 13-44: Factor de Carga. Real vs Sim

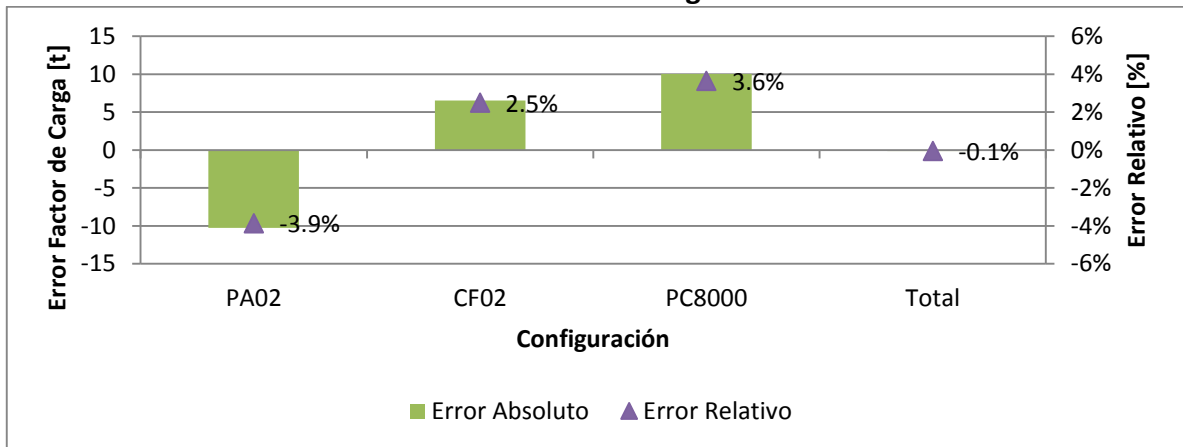


Gráfico 13-45: Errores Factor de Carga. Real vs Sim

13.10 Producción esperada y estadísticos de dispersión sobre escenarios de modelos de ausencia de operación de equipos de carga y naturaleza de parámetros operacionales

13.10.1 Producción esperada sobre escenario Distr_Fijo

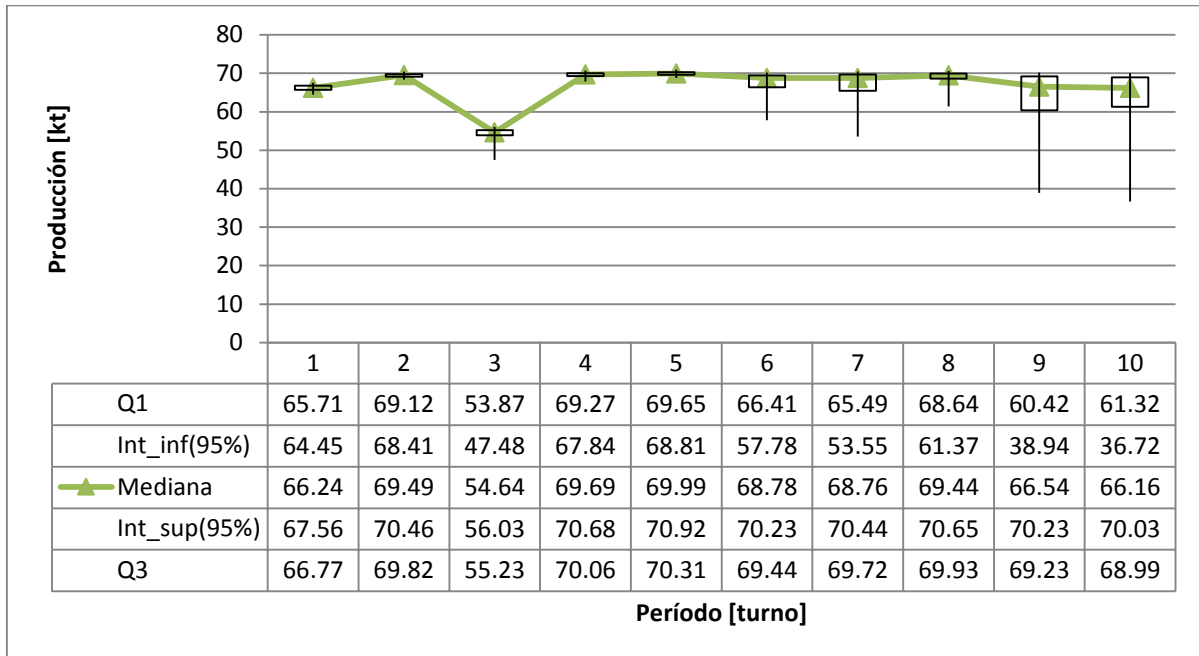


Gráfico 13-46: Distr_Fijo

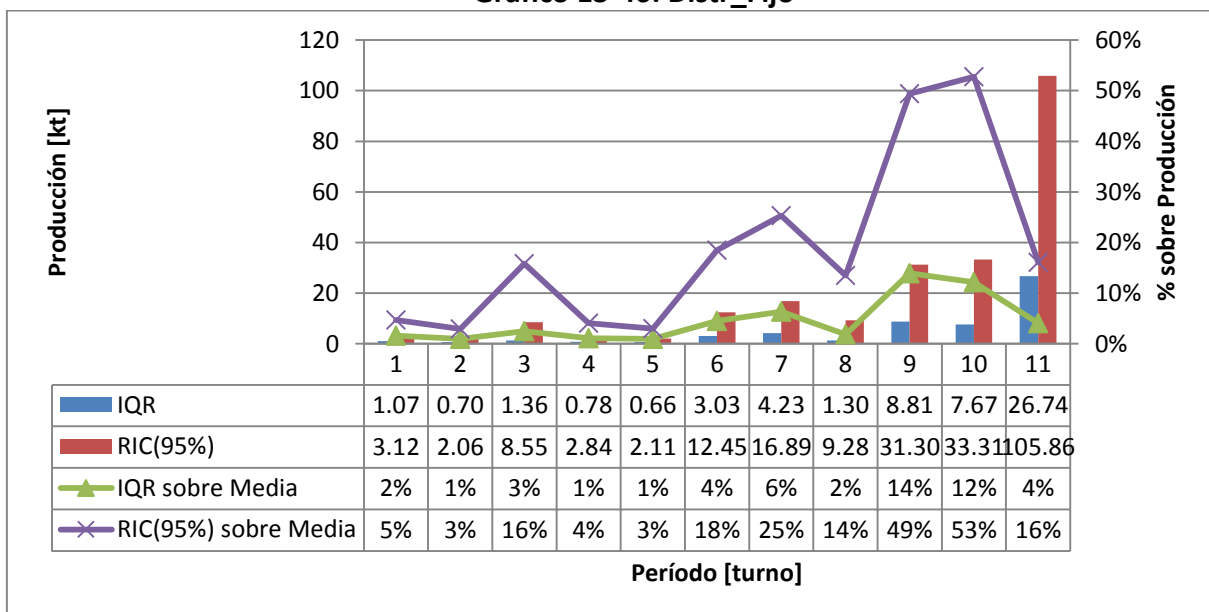


Gráfico 13-47: Estadísticos de Dispersión. Distr_Fijo

13.10.2 Producción esperada sobre escenario Distr_Var

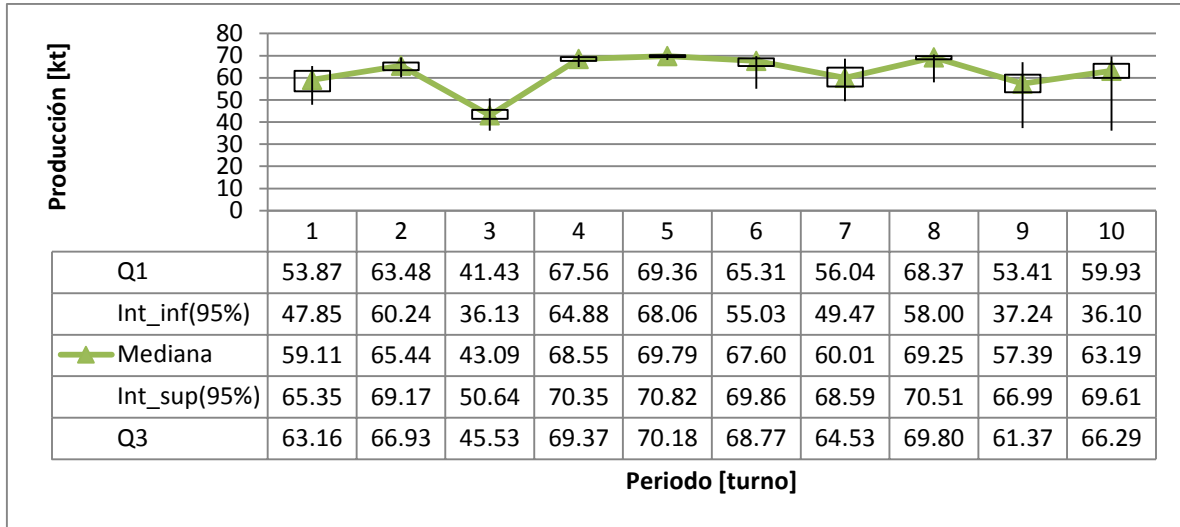


Gráfico 13-48: Distr_Var

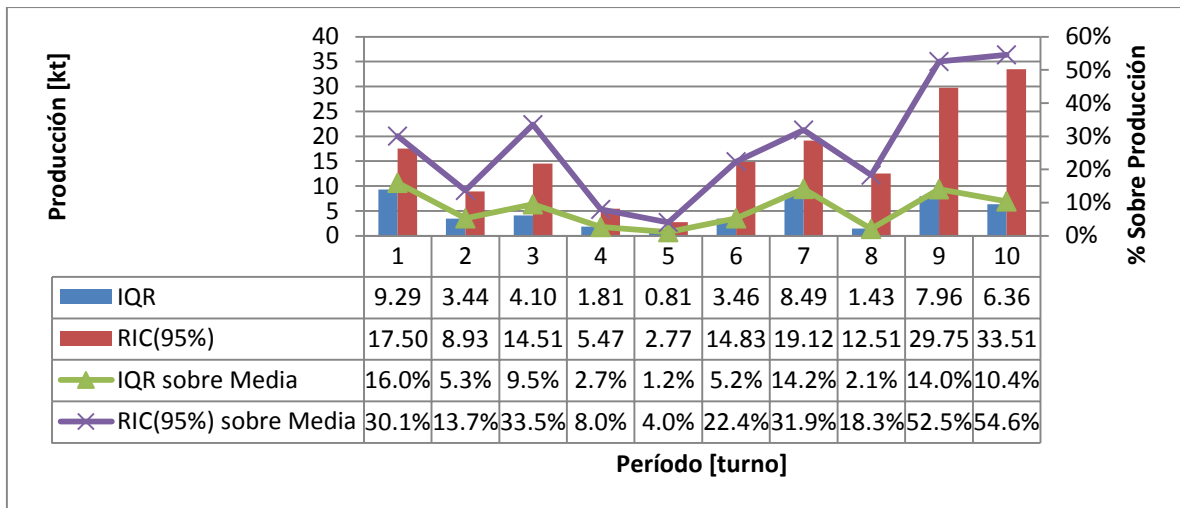


Gráfico 13-49: Estadísticos de Dispersión. Distr_Var

13.10.3 Producción esperada sobre escenario Medias_Fijo

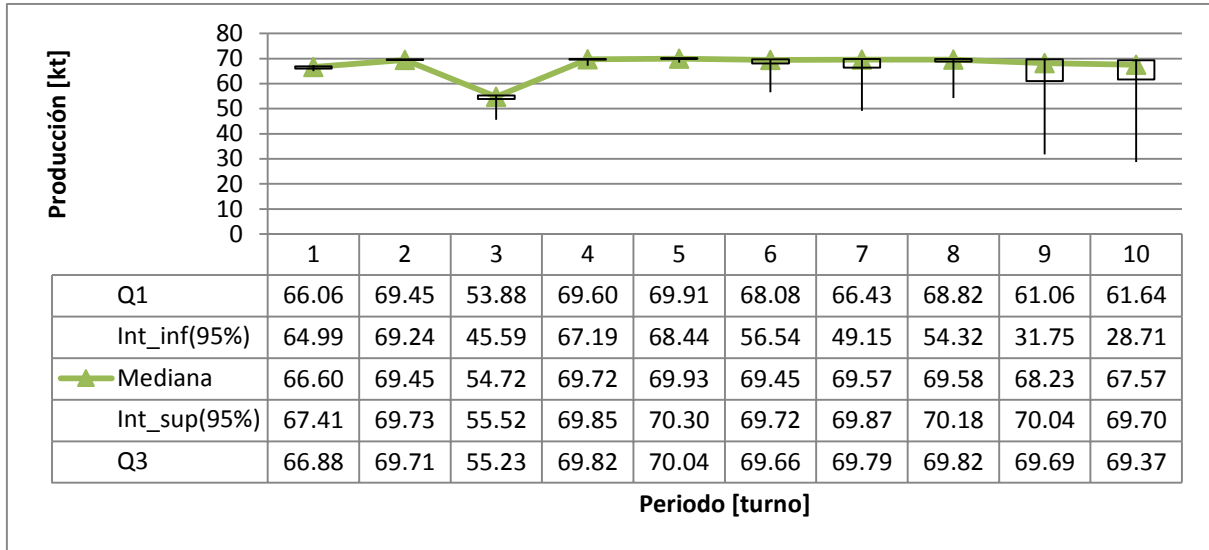


Gráfico 13-50: Medias_Fijo

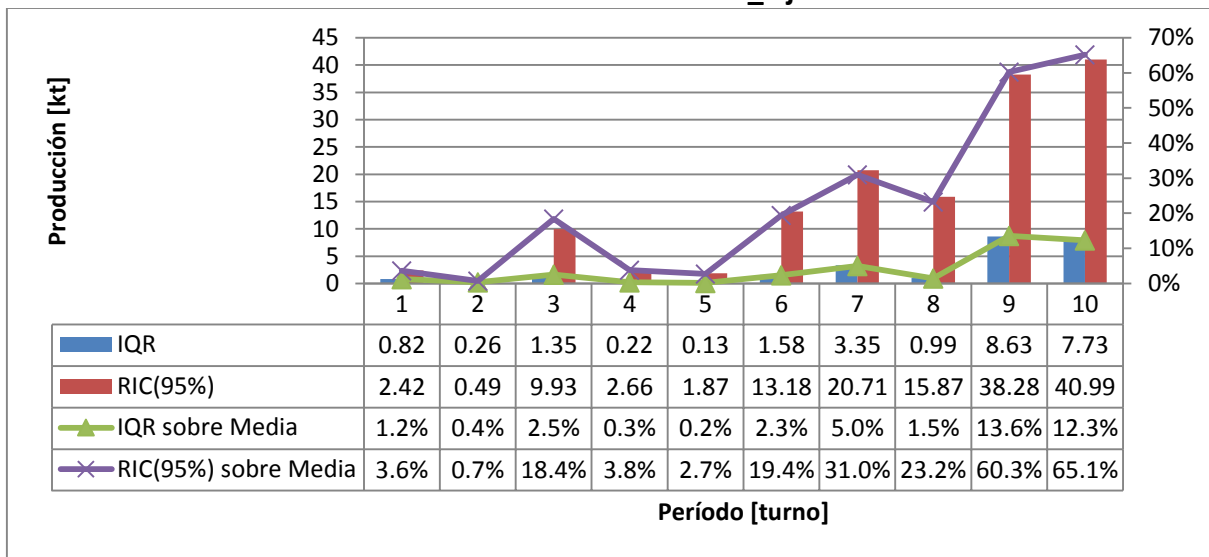


Gráfico 13-51: Estadísticos de Dispersión. Medias_Fijo

13.10.4 Producción esperada sobre modelo Medias_Distr

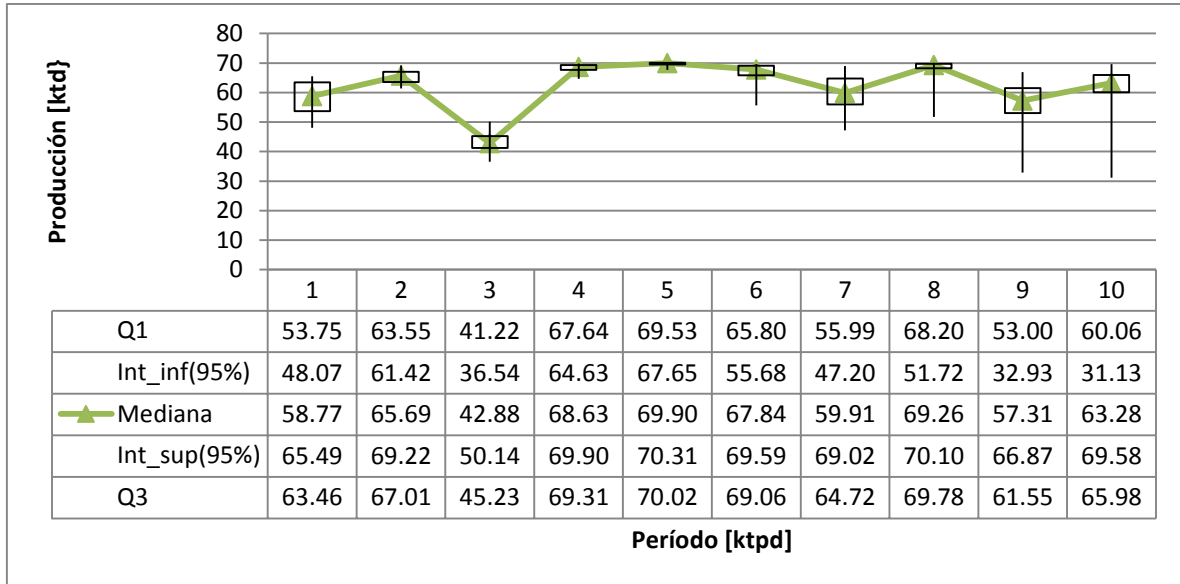


Gráfico 13-52: Medias_Var

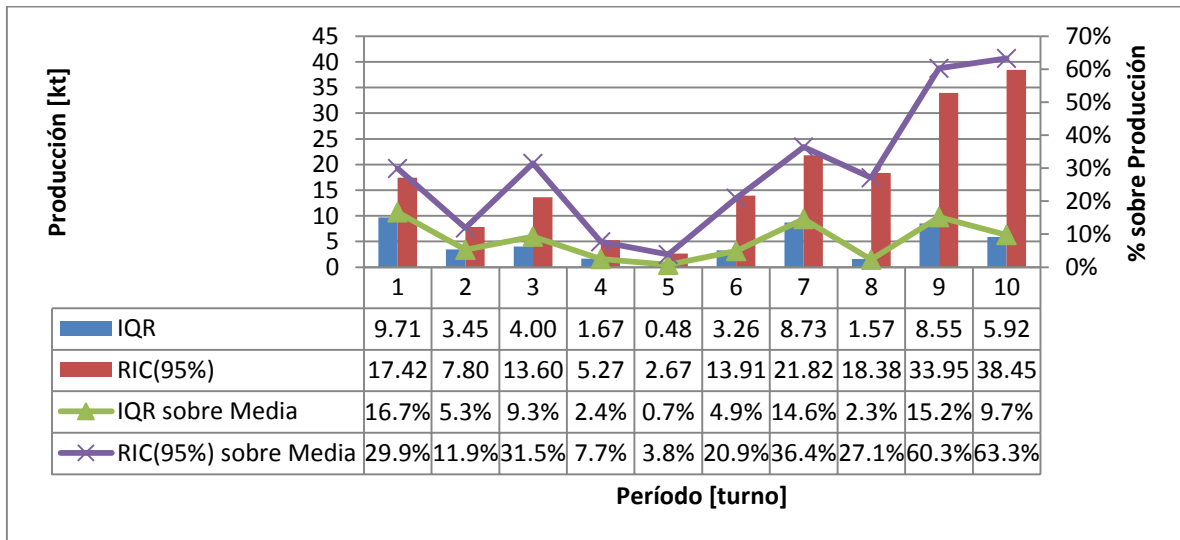


Gráfico 13-53: Estadísticos de Dispersión. Medias_Var