



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

ANÁLISIS DE RIESGO ASOCIADO A INCERTIDUMBRE OPERACIONAL
EN PLANES MINEROS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

CAROLA PAZ CERDA ZAMUDIO

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS SOLAR DROGUETT
JUAN IGNACIO GUZMÁN BARROS

SANTIAGO DE CHILE

2016

ANÁLISIS DE RIESGO ASOCIADO A INCERTIDUMBRE OPERACIONAL EN PLANES MINEROS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO

Hasta la actualidad, la planificación minera se ha realizado con la utilización de parámetros fijos, los cuales conducen a un plan determinista e inflexible que no permite capturar el real valor de la operación. El valor que se obtenga de dicha evaluación, en la práctica puede tener baja probabilidad de ocurrencia. Es por esto, que las investigaciones actuales relacionadas con la planificación minera incorporan en este proceso una cantidad mayor de información y variables no determinísticas para poder así obtener resultados robustos en términos de productividad y valor esperado del plan.

Con la realización de esta memoria se busca validar la incertidumbre operacional minera del modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM (creado por la empresa GEM) y del modelo de simulación para incertidumbre operacional DSim Open Pit (creado por el laboratorio de planificación minera Delphos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile) a través del análisis del plan minero de producción con escala quinquenal para una mina a rajo abierto.

Los objetivos específicos de este trabajo son presentar las variables operacionales relevantes que componen el modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM, en conjunto con la realización de simulaciones con el modelo DSim Open Pit caracterizada por las principales incertidumbres operacionales en base al plan minero quinquenal real de la mina y con esto realizar una comparación entre las dos metodologías de análisis de incertidumbre para planes mineros, enfocados en la incertidumbre operacional.

Se realizaron simulaciones con ambos modelos para incertidumbre operacional en dos meses específicos del plan minero quinquenal, donde se generaron distribuciones de probabilidad tanto para el movimiento total desde banco como para el mineral enviado a planta. Se compararon las medias de las distribuciones obtenidas con los valores del plan minero determinístico.

Para los meses de enero de 2016 y enero 2017, la diferencia porcentual entre el plan y el modelo GEM|REEM para el mineral enviado a chancado es de 10,6% y 1,6%, respectivamente. Mientras que la diferencia entre el plan quinquenal y el modelo DSim Open Pit para ambos meses es de 8,5% y 8,1%, respectivamente. Por otro lado, la comparación entre los resultados obtenidos de ambos modelos de incertidumbre, muestra que la diferencia entre estos es menor al 11% en todos los casos.

A partir de estos resultados, se observa que el plan minero determinístico tiene poca probabilidad de ocurrencia, donde se le da mayor prioridad al envío de mineral a planta, lo que puede afectar a futuro la explotación de la mina. Además, se puede decir que ambos modelos representan la realidad operacional de acuerdo a los valores reales de desempeño de la mina.

RISK ANALYSIS ASSOCIATED TO OPERATIONAL UNCERTAINTY FOR MINE PLANNING IN OPEN-PIT OPERATIONS

Until now mine planning has been done with the use of fixed parameters, which lead to a deterministic and inflexible plan that does not allow to capture the real value of the transaction. Moreover, the value obtained from this evaluation in practice has zero probability of occurrence. That is why, current research related to mine planning incorporated into this process a greater amount of information and nondeterministic to obtain robust results in terms of productivity and expected value of plan variables.

The aim of this work is to validate the operational uncertainty from the risk assessment model GEM|REEM (created by GEM) and the simulation model for operational uncertainty DSim Open Pit (created by Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile), through the analysis of a five year scale plan for an open pit mining operation.

The objectives of this work are to study the most relevant variables of the risk assessment GEM|REEM model, to run a simulation model characterized by the main operational uncertainties based on a five year scale plan and finally, to make a comparison between the two risk assessment methodologies, focused on operational uncertainty.

Simulations were performed with both models for operational uncertainty in two specific months of the five-year plan, where probability distributions were generated for total rock movement from phase-bench and ore sent to processing plant. The means of each distribution were compared against the values of the deterministic mine plan.

For the months of January 2016 and January 2017, the percentage difference between the five-year plan and GEM|REEM model, the ore sent for crushing is 10.6% and 1.6%, respectively. While the difference between the five-year plan and DSim model for both months is 8.5% and 8.1%, respectively. On the other hand, comparison between the results obtained from both models of uncertainty, shows that the difference between these is less than 11% in all cases.

From these results, it is observed that both methods represent the operational reality of the mine, where the highest priority is given to the shipment of ore to the processing plant. Other destinations in the planning process have greater variability regarding reality, due to the decisions made by people in everyday life, having the priority of shipping ore to processing plant.

*A mis padres,
por alentarme a seguir mis sueños
y a mi esposo,
por su apoyo incondicional
en todos estos años juntos.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por estar siempre junto a mí. A mi madre Yolanda por su amor infinito y fuerza que me motivaron a seguir adelante con mucha energía. A mi padre Carol por su cariño y enseñanzas que despertaron en mí las ganas de estudiar ciencias e ingeniería. Gracias por todo el cariño y valores entregados, por darnos una educación privilegiada y por creer siempre en nosotros.

A mi hermana melliza Tamara, que admiro mucho, por su alegría y forma de ver la vida, que ha estado siempre conmigo y que tiene las palabras precisas para alentarme en cada momento. A mi hermana Daniela, por su cariño y todas las alegrías compartidas y a mi hermano Maximiliano, por su fuerza e inteligencia que todos admiramos. Ustedes me motivan a ser una mejor persona día a día. A Karen por todo su cariño y felicidad que contagia.

Agradecer a mi esposo Rodrigo, quien ha estado conmigo en cada momento de este largo camino universitario, apoyándome y creyendo en mí. Por darme sabios consejos en los momentos difíciles y fuerza para seguir adelante con mis metas y sueños, confiando en mis capacidades y entregándome su amor cada día. Por ser mi compañero de viaje y querer compartir cada momento conmigo.

A la familia de Rodrigo, por darme su apoyo y quererme como una López más.

Agradezco a mis amigas de toda la vida, Estefanía, Claudia, Betzabeth y Yanina, por estar presentes en todos los momentos importantes y por darme tantas alegrías. A Macarena Domínguez por sus consejos y amistad que me ayudaron a superar los obstáculos y siempre mirar hacia adelante. A mis amigos de minas, Valentina Rojas, Cherezade Saud, María Camila Grigaliunas, Javier Pérez, Matías Álvarez, Giovanni Pamparana y Nicolás Guarda, por haber estado en este gran camino junto a mí y hacer de esta experiencia una que jamás olvidaré.

Quiero agradecer al profesor Nelson Morales por toda la ayuda en la realización de este trabajo y por entregarme siempre su apoyo para seguir adelante. Al profesor Aldo Casali por todas las enseñanzas entregadas mientras fui estudiante y aquellas que aprendí cuando fui su auxiliar. Además, al profesor Xavier Emery por ser un gran profesor y por toda su entrega hacia el departamento.

Agradezco a los miembros del equipo de planificación minera de largo plazo de la mina Los Bronces por todo el apoyo y guía en el desarrollo de este trabajo. Al laboratorio Delphos por ayudarme en la realización de mi memoria y por los momentos compartidos más allá de las paredes de la universidad.

Finalmente, agradezco al departamento de Ingeniería de Minas por formarme como una profesional íntegra y darme las herramientas para ser una ingeniera de excelencia.

Tabla de contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Contexto..... | 2 |
| 1.2 | Objetivos..... | 4 |
| 1.2.1 | Objetivo general..... | 4 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.3 | Alcances..... | 4 |
| 1.4 | Estructura de la memoria..... | 5 |
| 2 | Revisión Bibliográfica..... | 6 |
| 2.1 | Planificación minera..... | 6 |
| 2.1.1 | Planificación estratégica..... | 6 |
| 2.1.2 | Planificación de largo plazo..... | 7 |
| 2.1.3 | Planificación de mediano y corto plazo..... | 8 |
| 2.1.4 | Planificación estocástica..... | 8 |
| 2.2 | Incertidumbre y riesgo en minería..... | 9 |
| 2.3 | Análisis de riesgos..... | 11 |
| 2.4 | Simulación de Monte Carlo..... | 12 |
| 2.5 | Gestión de riesgo..... | 14 |
| 2.5.1 | Norma ISO 31000:2009 de gestión de riesgos..... | 14 |
| 3 | Metodología..... | 17 |
| 3.1 | Modelo de gestión de riesgos GEM REEM..... | 17 |
| 3.1.1 | Estructura principal modelo GEM REEM..... | 17 |
| 3.1.2 | Metodología modelo GEM REEM..... | 19 |
| 3.2 | Modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit..... | 21 |
| 4 | Caso de estudio..... | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Caso de estudio modelo GEM REEM | 28 |
| 4.1.1 | Identificación de incertidumbres | 29 |
| 4.1.2 | Cuantificación de incertidumbres..... | 30 |
| 4.2 | Caso de estudio modelo DSim Open Pit..... | 32 |
| 4.2.1 | Descripción incertidumbre operacional..... | 34 |
| 5 | Resultados y discusión..... | 36 |
| 5.1 | Modelo de gestión de riesgos GEM REEM..... | 36 |
| 5.1.1 | Análisis de convergencia modelo de gestión de riesgos GEM REEM..... | 36 |
| 5.1.2 | Resultados modelo de gestión de riesgos GEM REEM | 38 |
| 5.2 | Modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit..... | 41 |
| 5.2.1 | Validación modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit | 41 |
| 5.2.2 | Análisis de convergencia simulador DSim Open Pit..... | 42 |
| 5.2.3 | Caracterización de distribuciones de parámetros operacionales | 44 |
| 5.2.4 | Resultados operacionales enero 2016..... | 48 |
| 5.2.5 | Resultados operacionales enero 2017..... | 51 |
| 5.3 | Comparación modelos de incertidumbre operacional..... | 54 |
| 5.4 | Análisis de resultados para la operación | 56 |
| 6 | Conclusiones..... | 60 |
| 7 | Recomendaciones | 62 |
| 8 | Bibliografía..... | 63 |
| 9 | Anexos..... | 65 |
| 9.1 | Anexo A: Incertidumbres identificadas | 65 |
| 9.2 | Anexo B: Plan de producción quinquenal 2016-2020..... | 68 |
| 9.3 | Anexo C: Distribuciones de probabilidad e histogramas experimentales | 69 |
| 9.3.1 | Factor de carga..... | 69 |

| | | |
|-------|---|----|
| 9.3.2 | Habilitación equipos de transporte | 70 |
| 9.3.3 | Tiempo de acuatamiento equipos de transporte | 70 |
| 9.3.4 | Tiempo de descarga equipos de transporte..... | 71 |
| 9.3.5 | Tiempos de carga equipos de transporte por equipo de carguío..... | 71 |
| 9.3.6 | Habilitación equipos de carga..... | 73 |
| 9.4 | Detalle de parámetros de distribuciones | 75 |
| 9.4.1 | Beta..... | 75 |
| 9.4.2 | Gamma..... | 75 |
| 9.4.3 | Log-Logistic | 76 |
| 9.4.4 | Triangular | 77 |
| 9.4.5 | Weibull | 77 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Valor del proyecto minero por etapa de planificación. | 3 |
| Figura 2.1: Componentes de la planificación minera. | 6 |
| Figura 2.2: Modelo de estimación tradicional versus estimación estocástica. | 8 |
| Figura 2.3: Clasificación del proceso de planificación minera según el grado de robustez y flexibilidad. | 9 |
| Figura 2.4: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros. | 10 |
| Figura 2.5: Gráfico tipo tornado. | 11 |
| Figura 2.6: Ingreso netos - Histograma/ Probabilidad acumulada obtenido de 5000 realizaciones | 12 |
| Figura 2.7: Relación entre principios, marco y procesos de la gestión de riesgo. Norma ISO 31000. | 15 |
| Figura 3.1: Esquema movimiento de materiales modelo GEM REEM. | 18 |
| Figura 3.2: Barra de herramientas modelo GEM REEM. | 19 |
| Figura 3.3: Proceso de gestión de riesgos. | 19 |
| Figura 3.4: Indicadores de cumplimiento del plan en base a la Gestión de Riesgos. | 21 |
| Figura 3.5: Descripción simulador DSim Open Pit. | 22 |
| Figura 3.6: Visualización 3D DSim Open Pit. | 24 |
| Figura 4.1: Fases activas plan de producción quinquenal 2016 - 2020. Vista en planta. | 25 |
| Figura 4.2: Movimiento material mina plan quinquenal. | 26 |
| Figura 4.3: Movimiento de lastre por fase. | 27 |
| Figura 4.4: Movimiento de mineral por fase. | 27 |
| Figura 4.5: Gráfico precio de cobre y molibdeno para plan quinquenal. | 29 |
| Figura 4.6: Red de transporte de material enero 2016. | 32 |
| Figura 4.7: Caracterización por tipo de incertidumbre operacional. | 35 |
| Figura 5.1: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 100 realizaciones. | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.2: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 500 realizaciones. | 37 |
| Figura 5.3: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 1000 realizaciones. | 37 |
| Figura 5.4: Histograma de producción total desde banco para enero 2016. Modelo GEM REEM. | 38 |
| Figura 5.5: Histograma de mineral total a chancado para enero 2016. Modelo GEM REEM. | 39 |
| Figura 5.6: Histograma de producción total desde banco para enero 2017. Modelo GEM REEM. | 39 |
| Figura 5.7: Histograma de mineral total a chancado para enero 2017. Modelo GEM REEM. | 39 |
| Figura 5.8: Movimiento de mineral a chancado real versus promedio 100 simulaciones..... | 41 |
| Figura 5.9: Movimiento total enero 2016 para 100 simulaciones. | 43 |
| Figura 5.10: Mineral a chancado enero 2016 para 100 simulaciones. | 43 |
| Figura 5.11: Red de transporte y topografía enero 2016. | 48 |
| Figura 5.12: Histograma movimiento total desde banco. Enero 2016. | 50 |
| Figura 5.13: Histograma mineral a chancado. Enero 2016. | 50 |
| Figura 5.14: Red de transporte y topografía enero 2017. | 51 |
| Figura 5.15: Histograma movimiento total desde banco. Enero 2017. | 53 |
| Figura 5.16: Histograma mineral a chancado. Enero 2017. | 53 |
| Figura 5.17: Gráfico de tornado del impacto de riesgos de producción de cobre quinquenal. | 57 |
| Figura 5.18: Distribución producción de cobre plan quinquenal terminando con riesgo en sistema carguío-transporte. | 58 |
| Figura 9.1: Histogramas factor de carga equipos de transporte. | 69 |
| Figura 9.2: Histogramas de habilitación de equipos de transporte. | 70 |
| Figura 9.3: Histogramas tiempo de aculatamiento equipos de transporte. | 70 |
| Figura 9.4: Histogramas tiempo de descarga equipos de transporte. | 71 |
| Figura 9.5: Histogramas tiempos de carga flota KOM 930E. | 71 |
| Figura 9.6: Histogramas tiempo de carga flota KOM 830E..... | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 9.7: Histogramas tiempo de carga flota CAT 795..... | 72 |
| Figura 9.8: Histogramas tiempo de carga flota KOM 960E..... | 73 |
| Figura 9.9: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PAB05, PAB06, PAB07, PAB08. | 73 |
| Figura 9.10: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PAB10, PAB11, PAB12, PHK09. | 74 |
| Figura 9.11: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PHK13, PHK14, CFL07, CFL08..... | 74 |
| Figura 9.12: Distribución Beta. Parámetros (0, 1, 1,5, 2)..... | 75 |
| Figura 9.13: Distribución Gamma. Parámetros (0, 2, 1). | 76 |
| Figura 9.14: Distribución Log-Logistic. Parámetros (0, 3, 1). | 76 |
| Figura 9.15: Distribución triangular. Parámetros (0, 1, 0,75). | 77 |
| Figura 9.16: Distribución Weibull. Parámetros (0, 1,5, 1). | 78 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1: Etapas del proceso de planificación. | 7 |
| Tabla 4-1: Resumen plan de producción quinquenal 2015 – 2020. | 27 |
| Tabla 4-2: Tonelaje de fases activas..... | 28 |
| Tabla 4-3: Plan de producción enero 2016 y enero 2017. | 28 |
| Tabla 4-4: Incertidumbres relevantes identificadas..... | 30 |
| Tabla 4-5: Distribuciones de probabilidad factores de ajuste para riesgos productivos | 31 |
| Tabla 4-6: Descripción equipos de carga y transporte. | 33 |
| Tabla 4-7: Velocidad aislada de equipos de transporte. | 33 |
| Tabla 5-1: Producción de cobre total para el plan quinquenal. Estimado con 100, 500 y 1.000 realizaciones. | 36 |
| Tabla 5-2: Resultados modelo GEM REEM para producción enero 2016 y enero 2017..... | 40 |
| Tabla 5-3: Resultados GEM REEM versus plan de producción determinístico..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Tabla 5-4: Comparación mineral a chancado real versus promedio 100 simulaciones..... | 42 |
| Tabla 5-5: Distribuciones de probabilidad. Factor de carga equipos de transporte. | 44 |
| Tabla 5-6: Distribuciones de probabilidad. Habilitación equipos de transporte. | 45 |
| Tabla 5-7: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de aculatamiento equipos de transporte. | 45 |
| Tabla 5-8: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de descarga equipos de transporte..... | 45 |
| Tabla 5-9: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 930E..... | 46 |
| Tabla 5-10: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 830E.... | 46 |
| Tabla 5-11: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte CAT 795. | 46 |
| Tabla 5-12: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 960E.... | 46 |
| Tabla 5-13: Distribuciones de probabilidad. Habilitación equipos de carguío. | 47 |
| Tabla 5-14: Distribuciones de probabilidad. Rendimiento efectivo de chancadores. | 48 |
| Tabla 5-15: Equipos utilizados enero 2016 modelo DSim Open Pit..... | 49 |
| Tabla 5-16: Resultados productivos enero 2016 modelo DSim Open Pit..... | 50 |
| Tabla 5-17: Equipos utilizados enero 2017 modelo DSim Open Pit..... | 52 |
| Tabla 5-18: Resultados productivos enero 2017 modelo DSim Open Pit..... | 53 |
| Tabla 5-19: Resultados DSim Open Pit versus plan de producción determinístico..... | 54 |
| Tabla 5-20: Tabla comparativa de resultados para los modelos de incertidumbre operacional. Enero 2016. | 55 |
| Tabla 5-21: Tabla comparativa de resultados para los modelos de incertidumbre operacional. Enero 2017. | 55 |
| Tabla 9-1: Incertidumbres identificadas. | 65 |
| Tabla 9-2: Plan de producción quinquenal 2016-2020..... | 68 |

1 Introducción

La minería se define como el proceso de extracción de material de origen natural desde la corteza para obtener un beneficio económico (Newman et al., 2002).

La industria minera es una de las áreas económicas más importantes a nivel nacional y mundial, entregando las materias primas para la generación de productos tanto alimentarios como de construcción y aquellos utilizados para desarrollo tecnológico. Ha aportado al desarrollo de países como China e India, en donde se destaca el consumo de China, con un total de 11.352 Mton de cobre refinado el año 2014, siendo el principal consumidor de este *commodity* a nivel mundial (Cochilco, 2015).

A nivel nacional, en el año 2014 la industria minera aportó un 11,2% al PIB, con un porcentaje de las exportaciones nacionales de 54,2%, lo que la hace una de las industrias más influyentes a nivel nacional (Cochilco, 2015). En el mercado del cobre en particular, Chile es el principal productor del mundo. El año 2014 la minería chilena representó el 31,2% de la producción mundial de cobre. Las inversiones de la gran minería del cobre/oro en el año 2013 alcanzaron los 14.783 MMUS\$, siendo muy importantes para lograr mantener la participación de ellos en el mercado (Cochilco, 2015).

Como todo sector económico, la industria minera se compone de etapas, las cuales son las responsables de dar valor al negocio minero. Estas etapas forman parte de la cadena de valor de la industria minera, las cuales son: Exploración y adquisiciones, Desarrollo, Explotación y concentración, Fundición y refinación, Manufactura y Reciclaje (Horsley, 2002), donde gran parte del valor se encuentra en las etapas de desarrollo y explotación, por lo que la planificación minera es una de las principales áreas que permite dar grandes ganancias al proyecto minero.

Como se dijo anteriormente, la planificación minera es una parte muy importante dentro de la cadena de valor, tanto en las etapas de proyecto como en la operación. Para generar el máximo de valor en la extracción y el tratamiento del mineral, la planificación se lleva a cabo en tres horizontes: planificación a largo plazo, mediano plazo y corto plazo. Los planes de corto plazo son generalmente asociados a información más abundante, por lo tanto, los modelos tienen una menor incertidumbre, sin embargo, capturan una mayor variabilidad de las características geológicas. Por otro lado, en los modelos de largo plazo, los métodos de estimación tienden a ocultar esta variabilidad, proporcionando interpretaciones suavizadas (Yarmuch, Ortiz, 2011).

Cada una de las etapas de la planificación minera se realiza en diferentes escalas temporales, volúmenes de datos y en consecuencia, certidumbre. Es por esto, que en este proceso se realizan los esfuerzos para que los planes mineros generados se puedan cumplir a lo largo de toda la vida de la mina, generando arreglos de los planes mineros en cada horizonte todos los años. Para disminuir la incertidumbre de los planes, se introduce el análisis de riesgo asociado a las incertidumbres que afectan al cumplimiento del plan de producción, generando así una serie de escenarios posibles para realizar un plan minero que considere las condiciones particulares de cada mina, además de la historia y predicciones del futuro.

1.1 Contexto

El uso de técnicas apropiadas para la evaluación de un proyecto es más importante en la industria minera que en otras industrias. Esto se debe a que la industria minera es extremadamente intensiva en capital, requiere muchos años de producción para poder llegar a flujos de caja positivos y requiere de proyectos de larga duración comparados con otras industrias. El mayor desafío para la evaluación, es incluir el riesgo de los proyectos mineros, el efecto del tiempo y el manejo de la flexibilidad de la evaluación realizada (Topal, 2008).

La minería se compone de cinco etapas: prospección, exploración, desarrollo, explotación y recuperación. En la primera fase, los geólogos utilizan inspección visual y mediciones físicas de las propiedades de la tierra para descubrir yacimientos minerales. En la fase de exploración, los geólogos determinan el valor del depósito mediante la perforación para estimar la concentración de minerales y su variabilidad a lo largo del cuerpo mineralizado. La etapa de desarrollo consiste en obtener los derechos para acceder al mineral y prepararlo para la extracción mediante la eliminación del suelo y mineral estéril que cubren el área. La etapa de desarrollo traduce los estudios de planificación dentro del diseño minero a través de la determinación del método de explotación, que consiste en la disposición geométrica de la infraestructura; la estimación de la capacidad de producción y capital de la infraestructura; y la realización de ingeniería de detalle (Newman et al., 2002).

Hasta la actualidad la planificación minera se ha realizado con la utilización de parámetros fijos, los cuales conducen a un plan determinista e inflexible que no permite capturar el real valor de la operación. Es más, el valor que se obtenga de dicha evaluación, en la práctica tiene nula probabilidad de ocurrencia. Es por esto, que las investigaciones actuales relacionadas con la planificación minera incorporan en este proceso una cantidad mayor de información y variables no determinísticas para poder así obtener resultados robustos en términos de productividad y valor esperado del plan.

Las principales fuentes de incertidumbre en minería son geológica, de mercado y operacional (Meagher et. al., 2010), en donde la incertidumbre geológica se debe a que la ley y características de la roca son obtenidas a través de técnicas geo-estadísticas basadas en la información proveniente de sondajes. La incertidumbre operacional por otro lado impacta fuertemente en la realización de los planes mineros debido a la magnitud de variables observadas a nivel operacional. En estas dos fuentes de incertidumbre se basa la toma de datos para generar un modelo de incertidumbre el cual es utilizado para la evaluación de riesgos asociados a ellas.

A pesar de que en los últimos años se han visto mejoras en esta área, debido a la poca integración de las variables de la planificación y la incertidumbre asociada a ellas, se ve que aún hay una alta desviación entre los resultados operacionales en relación con los planes mineros realizados en etapas anteriores, en donde las principales diferencias entre lo planificado y la ejecución de estos planes se observan en los ingresos, los costos, la vida de la mina, las reservas y las inversiones.

Debido a que existe una gran cantidad de fuentes de incertidumbre, estas se pueden limitar a aquellas que generan riesgo asociado a la toma de decisiones financieras y que pueden tener un impacto en las inversiones necesarias para dar cumplimiento al plan.

A medida que los horizontes de planificación son más pequeños (de largo a corto plazo), las incertidumbres se van materializando en riesgos y se van obteniendo datos más próximos a la realidad, por lo que al realizar planes mineros que incluyan incertidumbres en su evaluación, disminuye el riesgo asociado ya que se toman medidas de mitigación de estos o cambios en los planes en forma oportuna, aumentando el valor esperado de la extracción. A este proceso se le llama gestión de riesgos (GEM 2015; Norma ISO 31000:2009).

Durante la planificación de largo plazo es donde mayor valor se puede agregar al proyecto evaluado. Al disminuir el riesgo en planificación, se puede maximizar el valor del negocio (Empresa minera Collahuasi, 2015).

La Figura 1.1 muestra el valor al proyecto minero por etapa de planificación, además de la agregación de valor por la disminución del riesgo.

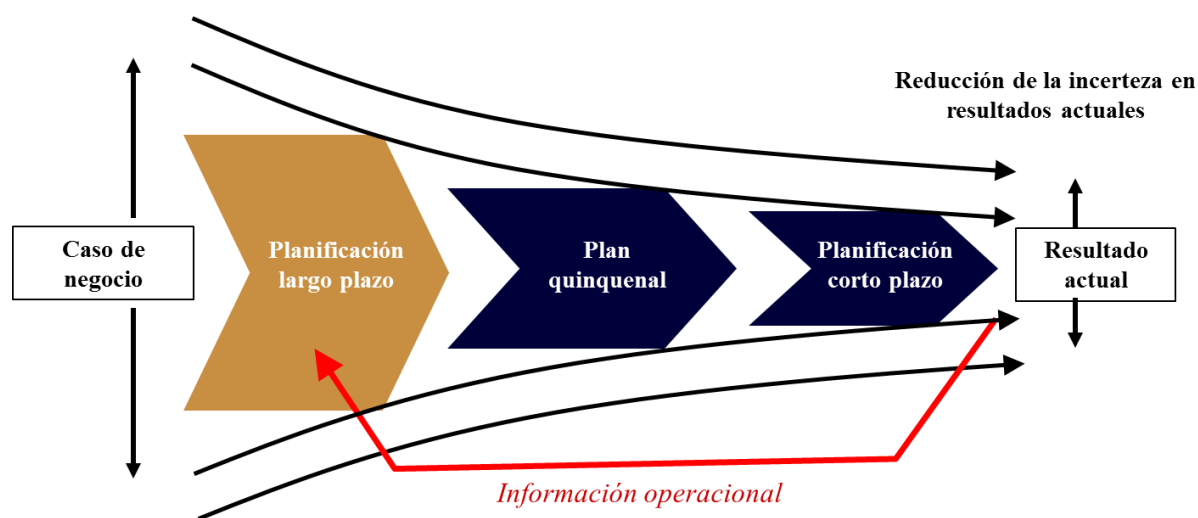


Figura 1.1: Valor del proyecto minero por etapa de planificación.

Fuente: Empresa minera Collahuasi, 2015.

Al analizar en etapas tempranas las incertidumbres asociadas (planificación estocástica), mayor valor presente (VAN) se puede agregar al plan minero realizado, asegurando mayores cumplimientos en los planes mineros de corto y largo plazo.

Al tener un contexto matemático, este permite integrar incertidumbre al diseño minero, lo que puede incrementar el valor de la planificación de la producción en un 25%. Casos de estudio muestran que los límites estocásticos del pit óptimo pueden ser 15% mayores en términos de tonelaje total cuando se comparan con la estimación de pit óptimo en forma convencional, mientras que puede haber un aumento del 10% del VAN con un cálculo de producción estocástico versus el cálculo convencional de los límites del pit. Estos resultados sugieren que hay un potencial de contribución en la utilización de los recursos minerales al integrar incertidumbre en el diseño minero (Dimitrakopoulos, 2011).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es validar la incertidumbre operacional minera del modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM y del modelo de simulación para incertidumbre operacional DSim Open Pit a través del análisis del plan minero de producción con escala quinquenal para una mina a rajo abierto.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la memoria son

- Estudiar las variables más relevantes que componen el modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM.
- Realizar simulaciones con las principales incertidumbres operacionales en base al plan minero quinquenal.
- Realizar comparación entre las metodologías de evaluación de riesgo en planes mineros.

1.3 Alcances

El trabajo realizado se enmarca dentro de los siguientes alcances:

- Minería a cielo abierto, particularmente centrado en el área de planificación de mediano plazo en una faena minera ubicada en Chile cuyo producto principal es cobre con subproducto molibdeno.
- Se utiliza el modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM, el cual analiza el plan minero quinquenal de la operación minera.
- El desarrollo del trabajo se realiza en base a las unidades críticas identificadas, las cuales tienen origen operacional.
- Se estudian metodologías de cuantificación de incertidumbre existentes, las cuales utilizan el método de Montecarlo (GEM|REEM) y simulaciones.
- Utilización de un modelo de simulación para incertidumbre operacional, el cual se centra en el proceso de manejo de materiales que considera las operaciones de carguío y transporte. El material procesado va desde el frente de carga y termina su proceso en el chancador primario.
- La comparación de las metodologías GEM|REEM y simulaciones se realiza para momentos puntuales del plan quinquenal, centrado en la incertidumbre operacional minera.

1.4 Estructura de la memoria

La estructura de la memoria realizada consta de ocho capítulos además del capítulo de anexos. Cada uno de estos capítulos compone partes diferentes del trabajo realizado tanto de investigación como desarrollo personal. Los contenidos de cada uno de ellos se detallan a continuación:

1. Introducción

En este capítulo se describe el tema de memoria, el contexto y motivación bajo el cual se realiza el trabajo, los objetivos tanto generales como específicos y los alcances que se consideraron para el desarrollo del tema de memoria.

2. Revisión Bibliográfica

Consta de toda la literatura científica publicada, además de la información encontrada en libros y tesis, relacionada con el tema de memoria que sirve como apoyo para el trabajo que se realizará a lo largo de la memoria.

3. Metodología

En este capítulo se describe la metodología que se utiliza para la realización del trabajo y lograr cumplir con los objetivos planteados en el primer capítulo antes descrito.

4. Caso de estudio

Este capítulo describe los antecedentes de la mina estudiada, junto con la información necesaria para poder realizar el trabajo. Se separa en dos secciones, las cuales se caracterizan por la información requerida por cada modelo de incertidumbre utilizado.

5. Resultados y discusión

En este capítulo se describen los resultados encontrados y análisis de estos con respecto a los alcances que se definieron en la memoria.

6. Conclusiones

De acuerdo a los resultados y análisis realizados se genera el capítulo de conclusiones las cuales son acorde a los objetivos que se plantean al inicio del trabajo.

7. Recomendaciones

Las recomendaciones son líneas de estudio que pueden seguirse por otros pares o estudiantes a partir del trabajo realizado en la memoria.

8. Bibliografía

Este capítulo consta de la lista de literatura científica publicada utilizada durante la realización de la memoria.

2 Revisión Bibliográfica

En este capítulo se mencionan los antecedentes y análisis referentes a la literatura analizada que sirve como apoyo para lo realizado a lo largo de la memoria.

2.1 Planificación minera

La planificación minera es una parte esencial del proceso para maximizar el retorno de un proyecto, la cual tiene cuatro componentes: planificación estratégica, plan de negocios, plan minero y plan anual (Horsley, 2002). La Figura 2.1 muestra estos cuatro componentes.

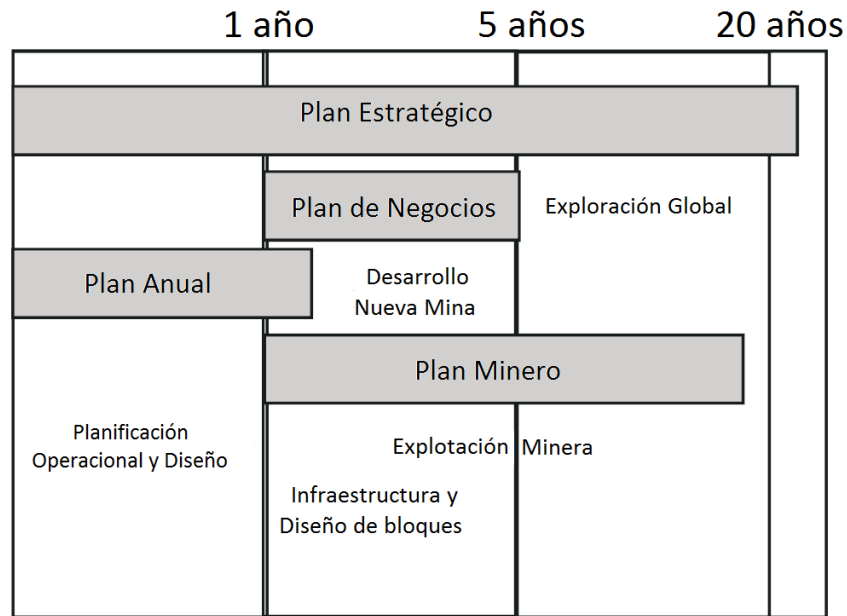


Figura 2.1: Componentes de la planificación minera.

Fuente: Horsley, 2002.

Los horizontes de la planificación tienen relación a la escala de tiempo que tiene cada uno de los componentes de la planificación minera. Estos horizontes son: estratégico – largo plazo, mediano plazo y corto plazo.

2.1.1 Planificación estratégica

Según Horsley (2002), la planificación estratégica se puede definir como el posicionamiento para aprovechar posibles resultados futuros. Estos resultados pueden ser eventos discretos, tales como un cambio en gobierno, o un cambio gradual en el tiempo, tales como un cambio en la demanda de un producto en particular.

Cualquier suceso o cambio que afecta directa o indirectamente el futuro de una empresa debe ser identificado y evaluado. Habrá algunos resultados que son importantes y pueden ser influyentes a la hora de la toma de decisiones a nivel estratégico en una empresa.

2.1.2 Planificación de largo plazo

La planificación de largo plazo consiste en una serie de etapas que buscan a partir de la información proveniente de un modelo de bloques, obtener el potencial valor del proyecto, el cual se realiza indicando de manera detallada las especificaciones relacionadas en términos de inversión y producción tanto para el proceso mina como planta (Horsley, 2002).

Estos modelos pueden presentar una gran cantidad de información, sin embargo, se destaca la ley del mineral, densidad y ubicación del bloque en el espacio. Es a partir de esta información en conjunto con los parámetros técnicos, requerimientos geomecánicos, anchos mínimos operables, altura de bancos, tamaño de bermas, etc, y económicos, que se realizan las etapas de planificación de largo plazo (Horsley, 2002).

El proceso de planificación es genérico y puede ser adaptado para muchos tipos de proyectos, incluyendo la planificación de minas a cielo abierto como también aquellos proyectos desarrollados en minería subterránea. El proceso de planificación se puede describir como una secuencia de pasos por simplicidad, sin embargo, es común volver a etapas anteriores a medida que se tiene mayor información. El resumen de los pasos para la planificación se muestra en la Tabla 2-1 (Whittle, 2011).

Tabla 2-1: Etapas del proceso de planificación.

| Paso | Acción | Detalles |
|------|---|--|
| 1 | Preparación general | Designar roles. Realizar análisis de los <i>stakeholder</i> . Determinar propósito y alcances. |
| 2 | Preparación de las entradas para el estudio | <ul style="list-style-type: none">• Información acerca de exploración y derecho minero en el área de interés• Información de recursos, incluyendo reportes, mapas, datos de sondajes y modelos de bloque para el área de interés• Para minas existentes, información acerca de la operación y equipos, instalaciones de procesamiento e infraestructura• Información acerca de métodos de explotación y procesamiento que se pueden considerar en el estudio• Información acerca leyes ambientales y métodos de explotación y detalles de exploración y derecho minero• Pronóstico de demanda y precios del <i>commodity</i>• Pronóstico de costos futuros |
| 3 | Marco | Determina el set de decisiones y alternativas que serán analizadas como parte del estudio. |
| 4 | Valoración | Dirige las alternativas de modelamiento, optimización y evaluación económica. Evaluación de riesgo de las principales alternativas. |
| 5 | Selección | Selecciona la mejor alternativa de plan. Selecciona las acciones para preservar opciones futuras. |

Todo el proceso se puede aplicar una o iterativamente dependiendo el grado de profundidad que se requiera en el estudio para el análisis de los recursos.

2.1.3 Planificación de mediano y corto plazo

La planificación a mediano plazo traduce el plan de largo plazo en un plan operativo (con un horizonte de tiempo típicamente de 1 a 5 años), logrando la definición de un plan de producción y el presupuesto que permitan alcanzar las metas de producción. Por otro lado, es en la planificación a corto plazo en donde, a través de un plan de producción que generalmente es determinístico (es decir, no se considera la volatilidad de las variables que lo determinan) se llega a un máximo nivel de detalle respecto a la logística y los recursos requeridos en cada proceso, para lograr las metas de producción mensuales, y con ello cumplir con la planificación a mediano plazo en lo que refiere a producción y presupuesto (GEM, 2014).

La planificación de mediano plazo muestra más detalle en los primeros cinco años de producción. Su objetivo principal es asegurar el cumplimiento del plan de negocio. En general, el primer año es descrito en base mensual, el segundo y tercer año en cuatro trimestres, mientras que el cuarto y quinto año se describen en base semestral (en algunas minas, la descripción es mensual los dos primeros años, y los tres últimos en base trimestral). La planificación de corto plazo, es dividida en planes de cuatro días y planes diarios, el cual tiene mucho más detalle (Yarmuch, Ortiz, 2011).

2.1.4 Planificación estocástica

La planificación minera estocástica busca incluir en la generación de planes las incertidumbres que envuelven a los problemas mineros (que son incertidumbres geológicas, de mercado, operacionales, entre otras). La programación estocástica es una técnica de optimización usada cuando los problemas tienen incertidumbre, donde estas pueden representarse por medio de distribuciones de probabilidad o a través de posibles escenarios (Sepúlveda et. al., 2012).

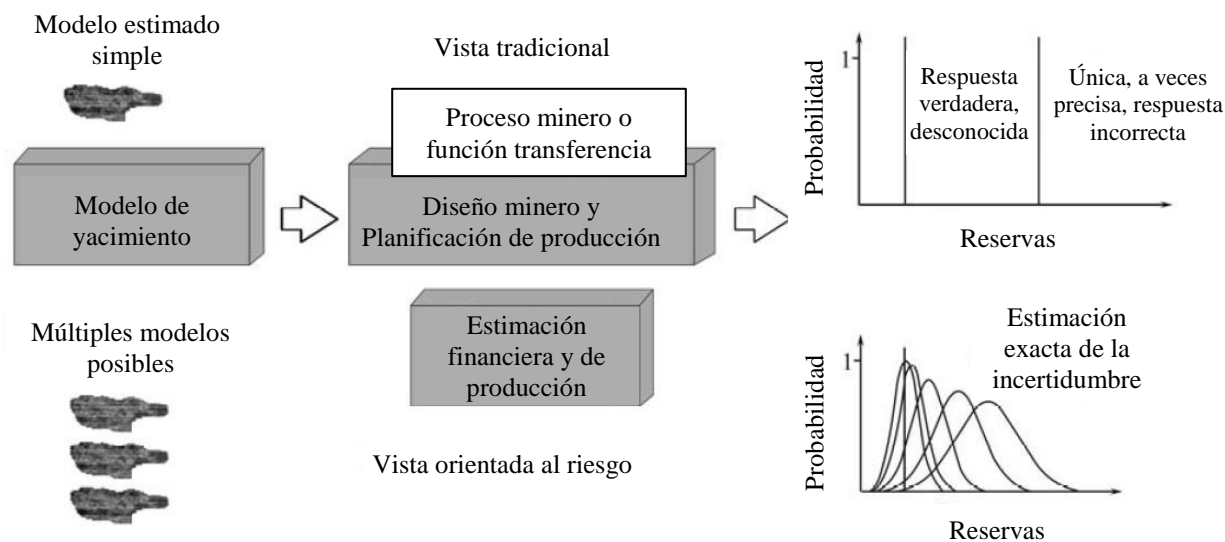


Figura 2.2: Modelo de estimación tradicional versus estimación estocástica.

Fuente: Dimitrakopoulos, 2007.

La Figura 2.2 muestra una planificación tradicional versus una planificación estocástica (considera incertidumbre) que abarca el modelo espacial estocástico geoestadístico con la optimización estocástica para el diseño minero y la planificación de la producción (Dimitrakopoulos, 2007).

La empresa de ingeniería GEM identifica dos maneras de tomar en cuenta la incertidumbre en las variables relevantes. En primer lugar, se busca que el plan minero a construir sea robusto a las incertidumbres incluidas. Esto implica que, al momento de evaluar el plan para muchos futuros posibles, su VAN esperado sea superior al de otros planes mineros. Adicionalmente, el plan minero puede poseer flexibilidad para responder a las incertidumbres incluidas. Esto implica que el plan minero cambiará dependiendo de lo que depara el futuro, de forma tal que se puedan aprovechar al máximo los buenos escenarios (o minimizar los daños producto de escenarios negativos) (GEM, 2013).

A partir de estas dimensiones, es posible categorizar las herramientas de planificación según la Figura 2.3. En la Planificación Determinística Inflexible no se toma en cuenta la incertidumbre en absoluto, mientras que en la Planificación Estocástica Flexible a partir del estado donde se generen, se busca hacer planes robustos a las incertidumbres relevantes y que posean cierta capacidad de respuesta ante ellas (GEM, 2013).

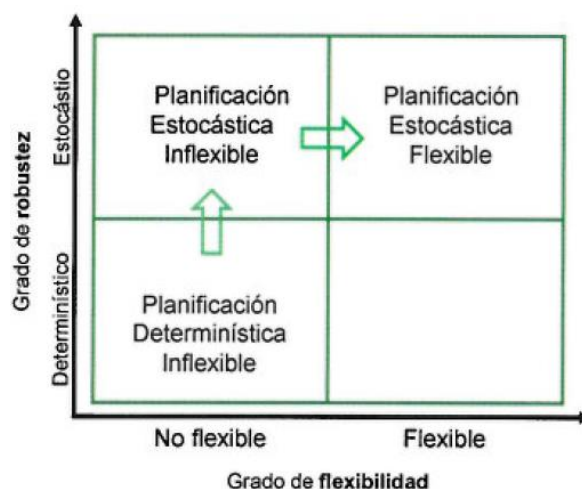


Figura 2.3: Clasificación del proceso de planificación minera según el grado de robustez y flexibilidad.

Fuente: GEM, 2013.

2.2 Incertidumbre y riesgo en minería

Debido a la naturaleza del negocio minero, los *inputs* a la planificación minera tienen distintos niveles de incertidumbre, y la incertidumbre puede generar riesgos. La toma de decisiones depende del grado de conocimiento que se tenga del problema. En un extremo está la escala determinística, mientras que en el otro, se encuentra la incertidumbre pura. Entre medio de estos dos casos, se encuentran los problemas en riesgo (Damghani et. al., 2009).

Los conceptos de riesgo e incertidumbre están relacionados pero son diferentes. La incertidumbre involucra a variables que son desconocidas y cambiantes, pero su incertidumbre puede ser conocida

y resuelta con el paso del tiempo, eventos y acciones. Es la posibilidad de que un evento ocurra o no. El riesgo por otro lado, es algo que se tiene y es el resultado de la incertidumbre. Son las consecuencias de la materialización de los eventos que tenían un grado de incertidumbre. A veces, el riesgo puede permanecer constante mientras la incertidumbre aumenta con el tiempo (Mun, 2006).

Se pueden distinguir distintas fuentes de incertidumbre asociadas a la planificación minera. Estas fuentes pueden ser internas o externas. Las fuentes internas son aquellas relacionadas con la organización propia de la empresa y sus activos. Las fuentes internas más importantes son geológica y operacional, ya que generan un gran impacto en el beneficio económico que se puede obtener (Mayer, Kazakidis 2007).

Las fuentes de incertidumbre externas son aquellas ajenas a la empresa, en donde el principal ejemplo es la incertidumbre de mercado, debido a su gran impacto en el valor del negocio. En esta categoría también se encuentran las políticas gubernamentales y el riesgo país (Mayer, Kazakidis, 2007; Rudloff, 2013). La Figura 2.4 muestra las principales fuentes de incertidumbre tanto internas como externas asociadas a los proyectos mineros.

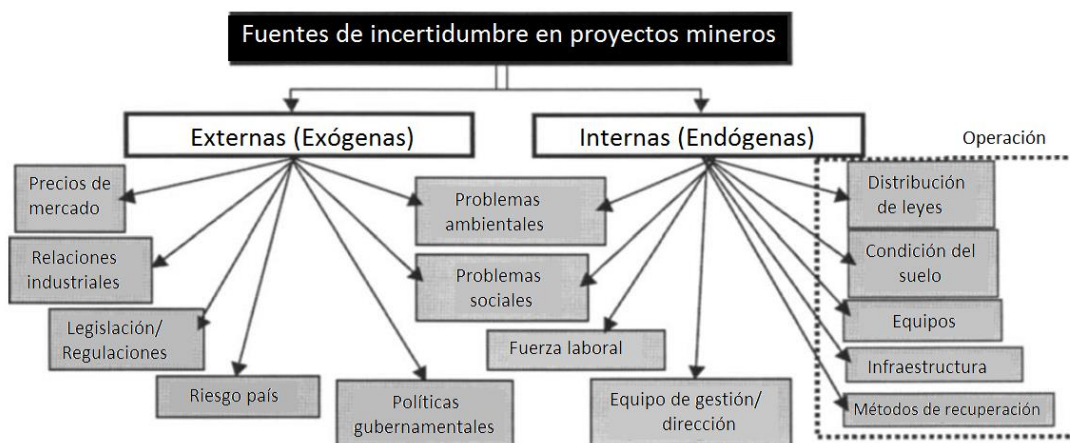


Figura 2.4: Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros.

Fuente: Mayer, Kazakidis, 2007.

Los riesgos deben ser una parte importante del proceso de toma de decisiones ya que se pueden tomar malas decisiones si es que no se realiza una evaluación de riesgos previa. Por ejemplo, si se supone que los proyectos son elegidos en base simplemente en una evaluación de los rendimientos, el proyecto elegido será aquel que tenga mayor retorno por sobre alguno con menores retornos. En la teoría financiera, los proyectos con retornos más altos, en la mayoría de los casos, tienen asociado un riesgo mayor. Es por esto que, además de realizar un análisis de los beneficios económicos que entrega un proyecto, se debe evaluar el riesgo asociado al mismo (Mun, 2006).

2.3 Análisis de riesgos

Luego de la identificación y clasificación de los riesgos, se realiza un análisis de estos, es decir, se estudia la probabilidad y las consecuencias de cada factor de riesgo con el fin de establecer el nivel de riesgo de nuestro proyecto.

Debido a los grandes beneficios que se pueden obtener en proyectos mineros es que estos están asociados a altos riesgos financieros. En particular en el caso de planes de producción, como análisis preliminar, se deben estimar los riesgos que se generan de las incertidumbres tanto internas como externas, para luego analizar y gestionar estos riesgos, tratando de eliminar o mitigar sus efectos (Mun, 2006).

Un método utilizado para hacer frente a las incertidumbres y a los riesgos asociados a estas es la aplicación de un análisis de escenarios (Mun, 2006). Como primera aproximación, se pueden elegir tres escenarios diferentes como posibles inputs de una determinada variable de la evaluación de un proyecto: el peor escenario, el escenario nominal y el mejor escenario posible.

Una alternativa para evaluar el impacto que tiene una variable en el resultado financiero de un proyecto es realizando un análisis de sensibilidad a la variable estudiada. Cada variable se perturba y varía en una cantidad predefinida, extrayendo el cambio en los ingresos netos resultantes de esta perturbación (Mun, 2006). El análisis de sensibilidad se realiza a cada una de las variables seleccionadas, obteniendo cambios en los ingresos netos asociados a cada variable. Este resultado puede representarse mediante un gráfico tipo tornado, en donde se representan los impactos negativos y positivos en los ingresos netos producto del análisis de sensibilidad de cada variable. La Figura 2.5 muestra un ejemplo de un gráfico tipo tornado de las variables que influyen en el cálculo del valor actual neto (VAN).

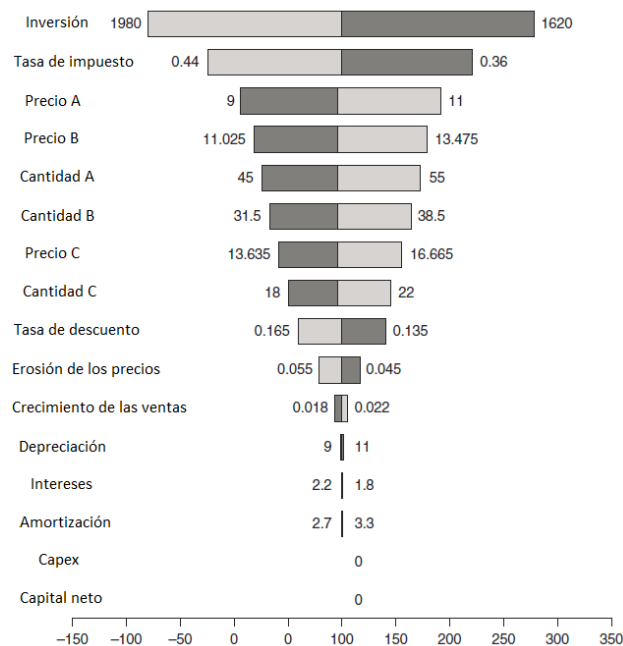


Figura 2.5: Gráfico tipo tornado.

Fuente: Mun J, 2006.

Este análisis sirve para entender y visualizar cuáles son las variables que tienen el mayor impacto y cuáles son las con menor impacto en el valor neto del plan. En esta misma línea, para tener un análisis más robusto, es necesaria la introducción de las simulaciones.

En las simulaciones las interdependencias se contabilizan mediante el uso de correlaciones. Las variables inciertas son simuladas miles de veces para emular todas las permutaciones y combinaciones posibles de los resultados, donde los ingresos netos resultantes de estos posibles resultados son tabulados y analizados.

Las simulaciones son una versión mejorada de los enfoques tradicionales como el análisis de sensibilidad y el análisis de escenarios pero realizadas automáticamente miles de veces, en donde se puede incluir todas las dinámicas interacciones entre las variables simuladas (Mun J, 2006). La Figura 2.6 muestra la distribución de probabilidad de los posibles resultados de ingresos netos realizados por la simulación.

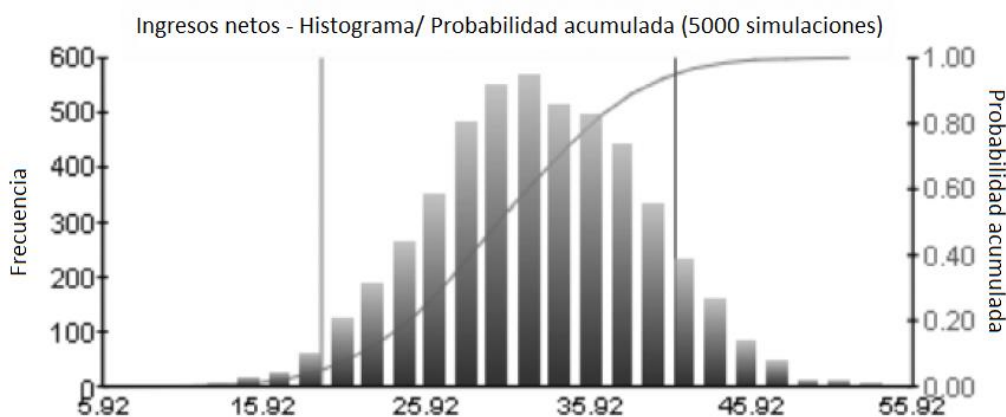


Figura 2.6: Ingreso netos - Histograma/ Probabilidad acumulada obtenido de 5000 realizaciones

Fuente: Mun, 2006.

2.4 Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo es un método numérico que permite resolver problemas complejos mediante la simulación de variables aleatorias. Se usa para resolver problemas tanto determinísticos como estocásticos donde el pasar del tiempo no juega un rol sustancial. El nombre de la simulación o modelo “Monte Carlo” se originó durante la Segunda Guerra Mundial, donde esta aproximación fue aplicada a problemas relacionados con el desarrollo de la bomba atómica (Law, 1991).

La Estadística Matemática formaliza la noción intuitiva de probabilidad de un suceso identificándola con su volumen o medida relativa en relación con el del universo de posibles resultados de un experimento aleatorio. El método de Monte Carlo utiliza esa identificación en la dirección opuesta, calculando el “volumen” de un conjunto e interpretando dicho volumen como una probabilidad. En el caso más simple eso significa llevar a cabo un muestreo aleatorio del universo de resultados posibles, hacer el recuento de los resultados que pertenecen a un determinado conjunto, calcular la fracción de los resultados pertenecientes a dicho conjunto con

respecto al número total de resultados generados y tomar dicha fracción como una estimación del volumen de dicho conjunto. Dentro de unas hipótesis bastante generales, la ley de los grandes números asegura que esa estimación converge al verdadero valor del volumen del conjunto a medida que aumenta el número de resultados generados artificialmente. Además, el teorema central del límite facilita información sobre la magnitud del error de estimación cuando el tamaño de la muestra generada es finito (López, 2008).

La simulación de Monte Carlo en su forma más simple es un generador de números aleatorios que es útil para la predicción, estimación y análisis de riesgos. Una simulación calcula numerosos escenarios de un modelo recogiendo repetidamente valores de una distribución de probabilidad escogida por el usuario para las variables inciertas y usando esos valores para el modelo. Como todos esos escenarios producen resultados similares en un modelo, cada escenario puede tener una estimación (Mun, 2006).

Ejemplo: Se quiere evaluar la integral:

$$I = \int_0^1 \varphi(x) dx$$

Su valor puede ser aproximado con la simulación de Monte Carlo (Law A, 1991). Considerando una variable X uniforme en el intervalo $[0,1]$, se puede interpretar la integral a calcular como una esperanza matemática:

$$I = \int_0^1 \varphi(x) dx = E\{\varphi(X)\}$$

Dicha esperanza matemática se puede evaluar utilizando una serie de realizaciones independientes $\{X_1, \dots, X_N\}$ de la variable aleatoria X :

$$E\{\varphi(X)\} \approx \bar{\varphi}(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi(X_i)$$

Además, se sabe que $\bar{\varphi}(X)$ tiene una distribución aproximadamente Gaussiana (teorema del límite central), con varianza:

$$var\{\bar{\varphi}(X)\} = \frac{1}{N} var\{\varphi(X)\} \approx \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \{\varphi(X_i) - \bar{\varphi}(X)\}^2$$

Un ejemplo de la utilización de Monte Carlo es el trabajo realizado por Samis y Davis (2014), en donde a través de simulación de Monte Carlo junto con opciones reales, genera escenarios de estimación del precio del oro para un proyecto minero sudafricano, logrando protección para los escenarios con un bajo precio del metal. El análisis muestra que la simulación puede ayudar a determinar si las condiciones de financiamiento son adecuadas y si estos términos se pueden modificar para que se adapte mejor al perfil de riesgo del proyecto.

2.5 Gestión de riesgo

Luego de la identificación y evaluación del riesgo, se definen las acciones que se realizarán para tratar el riesgo, éstas pueden ser de mitigación o eliminación de estos conforme a los objetivos que tiene cada compañía y considerando siempre que cualquier acción que se tome frente a los riesgos se tiene un costo asociado, el cual debe evaluarse al momento de tomar la decisión de eliminar, mitigar u otras acciones frente al riesgo.

El proceso de gestión de riesgo de GEM se basa en la norma ISO 31000:2009 de gestión de riesgos, la cual da las pautas para el tratamiento y gestión de riesgos que se debe tener dentro de una compañía. Esta norma está en vigencia desde 2009 y a continuación se detallan las etapas que componen la gestión de riesgo según la norma.

2.5.1 Norma ISO 31000:2009 de gestión de riesgos

La norma ISO 31000 de gestión de riesgos define orientaciones y principios para el diseño, implementación y mantenimiento de la gestión de riesgos de manera sistemática para toda forma de riesgo en diferentes contextos. Además tiene una serie de definiciones de los términos relevantes útiles en la gestión de riesgo en la organización.

En Chile, existen empresas consultoras que prestan el servicio de gestión de riesgos bajo la norma ISO 31000:2009, en particular, la empresa Prevención Integral, desarrolla una herramienta para poder contextualizar, analizar, evaluar y tratar el riesgo según la Norma ISO 31000, para el área de Planta de concentrando de la División Talcuna, de la minera San Gerónimo, en la Región de Coquimbo (Prevención Social, 2013). Otro ejemplo, es la empresa consultora SGS, que ofrece formación en ISO 31000 y evaluaciones de sistemas de gestión de riesgos a distintos sectores e industrias tanto en Chile como en el extranjero (SGS, 2016).

Este estándar internacional se puede aplicar a lo largo de la vida de la organización y en un amplio rango de actividades, incluyendo estrategias de decisión, operaciones, procesos, funciones, proyectos, bienes y servicios.

Puede ser aplicado a cualquier tipo de riesgo, cualquiera sea su naturaleza, tanto aquellos con consecuencias negativas como aquellos riesgos que tienen consecuencias positivas para la organización.

La relación entre los principios para manejar los riesgos, el marco en el cual ocurren y el proceso de gestión de riesgo descrito en el estándar se muestra en la Figura 2.7 a continuación.

Como se puede observar en la Figura 2.7, la norma ISO 31000 está estructurada en tres elementos clave para la gestión de riesgo, estos son:

1. Principios de la gestión de riesgos
2. Marco de trabajo para la gestión de riesgos
3. Proceso de gestión de riesgos

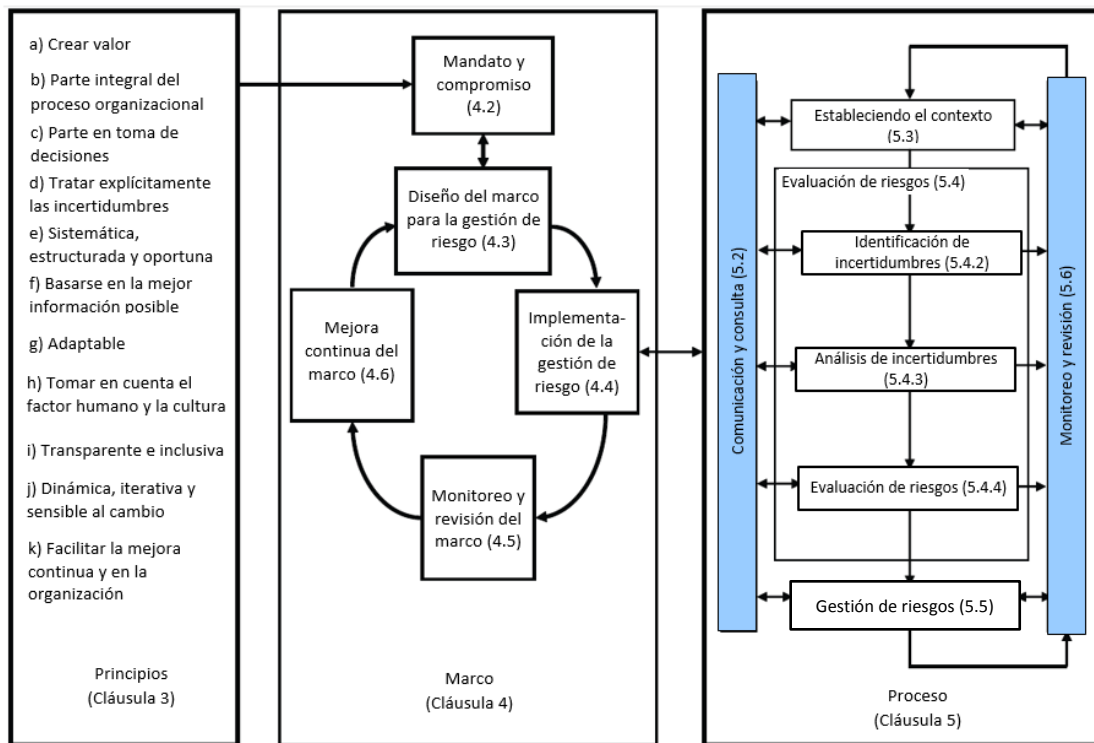


Figura 2.7: Relación entre principios, marco y procesos de la gestión de riesgos. Norma ISO 31000.

Fuente: Norma ISO 31000:2009.

2.5.1.1 Principios de la gestión de riesgos

Para que la gestión de riesgos sea efectiva, la organización debe cumplir en todos sus niveles los principios que se numeran a continuación.

1. Crear y proteger el valor
2. Estar integrada a todos los procesos de la organización
3. Ser parte de la toma de decisiones
4. Tratar explícitamente la incertidumbre
5. Ser sistemática, estructurada y oportuna
6. Basarse en la mejor información disponible
7. Alinearse al contexto y al perfil de riesgos de la organización
8. Tener en cuenta los factores humanos y culturales
9. Ser transparente e inclusiva
10. Ser dinámica, iterativa y sensible al cambio
11. Facilitar la mejora continua

2.5.1.2 Marco de trabajo para la gestión de riesgo

El marco de trabajo tiene como objetivo integrar el proceso de gestión de riesgos al gobierno corporativo. Provee los fundamentos y arreglos que deben estar insertos en todos los niveles de la organización.

2.5.1.3 Proceso de gestión de riesgo

De forma general, el proceso de gestión de riesgo debe ser:

- una parte integral de la gestión,
- arraigado en la cultura y prácticas organizacionales, y
- adaptado a los procesos de negocio de la organización.

El proceso de gestión de riesgos se compone de tres etapas: Establecimiento del contexto, Valuación de riesgos y Tratamiento de los mismos.

Por su parte, la Valuación (*assessment*) de los riesgos está formada por las etapas sucesivas de Identificación, Análisis y Evaluación de riesgos. La figura siguiente muestra un esquema de las etapas que componen el proceso de gestión de riesgos según la norma ISO 31000.

El modelo de gestión de riesgos GEM|REEM se basa en las cinco etapas que componen el proceso de gestión de riesgos. Estas etapas las describen como:

1. Identificación de las incertidumbres
2. Cuantificación de las incertidumbres
3. Categorización de riesgos
4. Evaluación de riesgos
5. Gestión de los riesgos

El proceso de gestión de riesgos finalmente se cierra con la interconexión de todas las etapas mencionadas con una fase de Comunicación y Consultas por un lado, y una fase de Monitoreo y Revisión por otro.

3 Metodología

A continuación se detalla la metodología utilizada en la realización del trabajo.

Las labores realizadas se dividen en dos líneas de trabajo, las cuales son el análisis del modelo de gestión de riesgos GEM|REEM, realizado por la empresa de ingeniería GEM y la utilización del simulador DSim Open Pit, para describir la incertidumbre operacional minera en puntos específicos del plan quinquenal.

3.1 Modelo de gestión de riesgos GEM|REEM

GEM|REEM es un modelo de evaluación, adaptado especialmente para la mina en estudio, que permite evaluar técnica y económicamente, a través del proceso de gestión de riesgos, el plan quinquenal 2016 de la mina estudiada como también planes quinquenales futuros (GEM, 2015). En la actualidad se encuentra operando en alrededor de 10 minas en Chile (GEM, 2016).

El modelo permite evaluar tanto la producción como el valor actual neto (VAN) de un plan minero-metalúrgico ingresado por el propio usuario en base a los parámetros técnicos y económicos definidos por él mismo. El modelo permite incorporar incertidumbres al plan ingresado, evaluar sus riesgos y reportar resultados asociados a su robustez.

3.1.1 Estructura principal modelo GEM|REEM

El usuario requiere cargar el plan minero-metalúrgico, al cual puede incorporarle riesgos con la barra de herramientas o *ribbon* GEM|REEM, editarlos, y simular los flujos de materiales generándose resultados productivos y económicos. Mediante la simulación se podrá conocer la robustez del plan minero-metalúrgico considerando sus respectivos estadísticos, así como también su sensibilidad ante los riesgos creados por el usuario (GEM, 2015).

El Modelo está diseñado para evaluar un plan minero quinquenal de la operación estudiada. El horizonte de evaluación es de 5 años considerando un quiebre mensual-mensual-trimestral-trimestral-trimestral, que se traduce en 36 periodos. Se modela el movimiento de materiales en la mina y en el remanejo de stock, y el procesamiento de sulfuros mediante dos líneas de conminución y una planta concentradora para obtener concentrado de cobre. A su vez, el procesamiento de óxidos mediante lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención, para obtener cobre en cátodos.

El movimiento de materiales queda definido por el tonelaje y sus propiedades geometalúrgicas, desde una fase o stock (origen) a un proceso (destino) específico. Para cada fase se consideran 4 destinos posibles:

- Mineral sulfuros
- Mineral lixiviable
- Mineral a stock
- Botadero

El procesamiento de sulfuros se encuentra modelado mediante un proceso de chancado del material proveniente de todas las unidades de materiales¹ (UMs) de sulfuros y stock, que homogeniza sus propiedades geometalúrgicas y envía a dos líneas de conminución, dependiendo de sus capacidades. El proceso de chancado considera un stock adicional que se acumula cuando las capacidades de las plantas restringen el sistema y que se utiliza cuando la capacidad conjunta de las plantas es mayor que el material proveniente de las UMs de mina y de las UMs stock (GEM, 2015).

La Figura 3.1 muestra el modelamiento del movimiento de materiales con sus procesos.

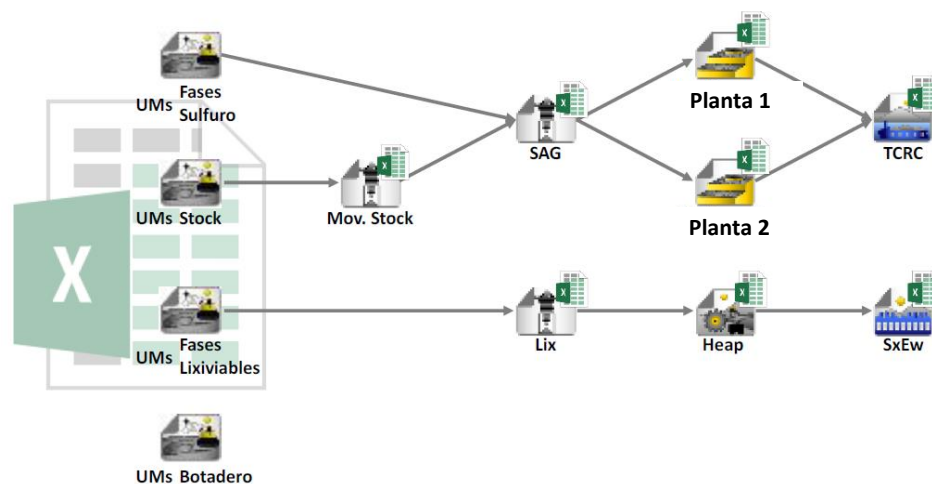


Figura 3.1: Esquema movimiento de materiales modelo GEM|REEM.

Fuente: GEM, 2015.

GEM|REEM requiere ciertos *inputs* mínimos para funcionar. Estos son el plan minero que se quiere analizar, la cuantificación de riesgos y, opcionalmente, los parámetros económicos.

El plan minero es caracterizado por los movimientos de la mina y el remanejo de stock para cada uno de los periodos que corresponda. Dicho plan debe tener asociado el tonelaje del material, como también la ley del *commodity* que corresponda. No obstante, en caso de querer incorporar variables adicionales el modelo lo permite (GEM, 2015).

El modelo está desarrollado sobre el *software* MS Excel habilitado para Macros. Para acceder a todas las funcionalidades del modelo se debe abrir la pestaña llamada GEM|REEM, en donde cada uno de los botones de la barra de herramientas tiene asociada una función específica. La Figura 3.2 muestra los distintos botones que conforman el modelo, comenzando desde la izquierda con la definición del plan minero, terminando con los posibles resultados que el modelo arroja.

¹Unidad de material (UM): Corresponde a cierto material proveniente de cierta zona de la mina que posee ciertas características (por ejemplo tonelaje o ley de cobre).

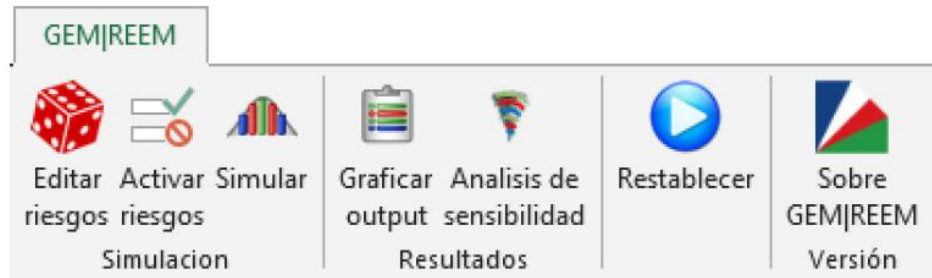


Figura 3.2: Barra de herramientas modelo GEM|REEM.

Fuente: GEM, 2015.

3.1.2 Metodología modelo GEM|REEM

El modelo de gestión de riesgos GEM|REEM se basa en la norma ISO 31000, la cual establece principios y guías para el diseño, implementación y mantenimiento de la gestión de riesgos en cualquier contexto. La Figura 3.3 muestra la metodología que utiliza el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM.

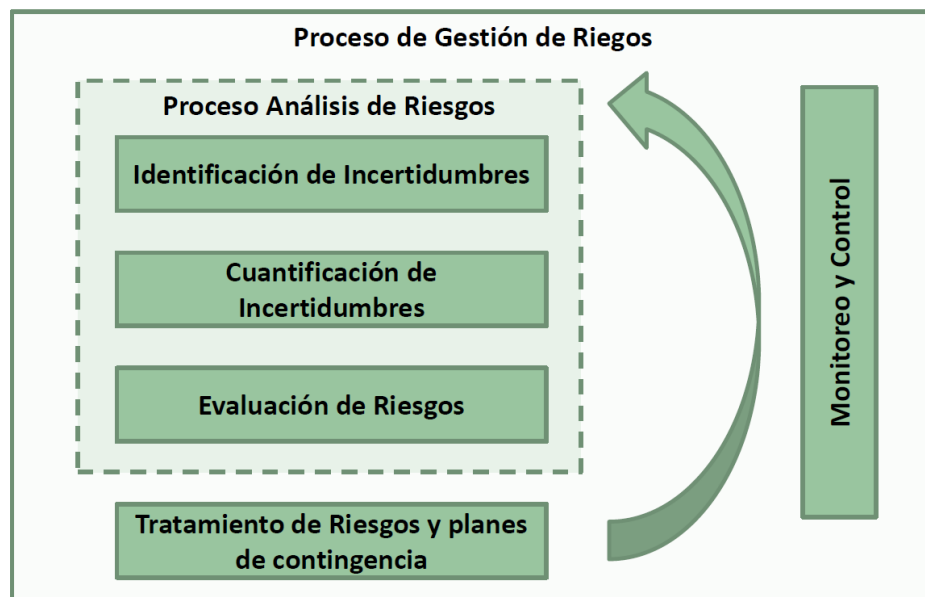


Figura 3.3: Proceso de gestión de riesgos.

Fuente: GEM, 2015.

La primera etapa consiste en la identificación de las incertidumbres. En este punto se numeran todas las incertidumbres que pueden afectar al plan minero en estudio y que podrían causar que no se cumplan los resultados comprometidos. El listado es generado por miembros de las distintas áreas encargadas del desarrollo de la faena (perforación y tronadura, carguío y transporte, servicios mina, planificación, etc.) en donde en conjunto van enumerando las incertidumbres más relevantes de cada una de las áreas involucradas.

Las incertidumbres identificadas se categorizan según ocurrencia y consecuencia y se agrupan en una matriz de incertidumbres. Con esta matriz se seleccionan aquellas incertidumbres que tienen un efecto mayor en la realización del plan minero.

Luego de la identificación, viene la etapa de cuantificación de las incertidumbres más relevantes. Esta etapa cuenta con dos procesos:

- Definir la probabilidad de ocurrencia asociada a cada incertidumbre relevante (determinando y/o ajustando una distribución de probabilidades o un proceso estocástico)
- Determinar el efecto que tiene la incertidumbre sobre el plan

Existen tres tipos de cuantificación: objetiva, subjetiva y mixta. La cuantificación objetiva se basa en datos históricos, bajo el supuesto de que estos representan de buena manera el comportamiento futuro. La cuantificación subjetiva está basada en juicio experto y la mixta es aquella que incluye componentes objetivas y subjetivas.

Para la cuantificación de las incertidumbres se utiliza la metodología de factor de ajuste, empleando datos históricos, donde se busca estimar su variabilidad con el fin de proyectar las desviaciones futuras. Se generan conjuntos de factores de ajuste a los cuales se les ajusta una distribución de probabilidad. Las ecuaciones utilizadas en el proceso de cuantificación son:

$$\text{Factor de ajuste} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor estimado}}$$

$$\text{Valor real} = \text{Valor programado} \cdot \text{Factor de ajuste}$$

En la etapa de evaluación de riesgos, los riesgos cuantificados se ingresan en un modelo de evaluación (en este caso GEM|REEM), que por medio de simulación de Monte Carlo permite ver el comportamiento del plan frente a distintas materializaciones de estos riesgos y así derivar los principales indicadores de riesgo de la operación. En esta etapa además se debe realizar un análisis de sensibilidad para determinar la importancia relativa de cada riesgo.

Como resultado de las tres etapas anteriores, se obtiene la distribución de probabilidad asociada a la cuantificación del plan estudiado, de donde se puede obtener el valor en riesgo, valor esperado, producción/VAN seguro, etc. de acuerdo al valor determinístico entregado por el plan minero original. La Figura 3.4 ilustra los indicadores de cumplimiento del plan en base a la Gestión de Riesgos.

Las tres etapas descritas anteriormente conforman el proceso de análisis de riesgos. Luego de esto, viene el proceso de tratamiento de los riesgos y planes de contingencia, en donde se cuantifica el valor del plan asociado al tratamiento de los riesgos más relevantes y medidas que se deben tomar de acuerdo a los riesgos principales.

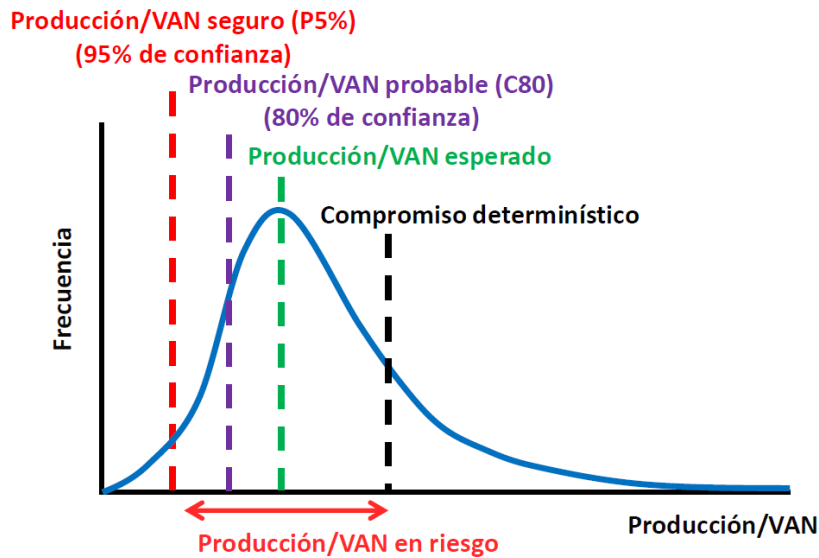


Figura 3.4: Indicadores de cumplimiento del plan en base a la Gestión de Riesgos.

Fuente: GEM, 2015.

Luego de la aplicación del modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM, se procede a evaluar cómo cambian los resultados según la elección de las distribuciones asociadas a las incertidumbres seleccionadas y ver si los resultados cambian significativamente con respecto al resultado original.

Se realiza un análisis de convergencia del método de Monte Carlo utilizado en el modelo estimando la cantidad de iteraciones necesarias para converger con un cierto porcentaje a la solución.

Con los resultados del modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM, se determinan los puntos específicos del plan minero en donde se realizará la simulación para incertidumbre operacional con el fin de poder comparar los resultados obtenidos por ambos métodos de estimación.

El simulador ocupado para hacer la evaluación de riesgo del plan fue desarrollado por el Laboratorio de planificación minera Delphos del Departamento de Minas de la Universidad de Chile. Para su utilización se deben caracterizar los parámetros operacionales del sistema minero en estudio.

Se deben comparar los resultados entre el modelo de evaluación de riesgos GEM|REEM y el simulador para incertidumbre operacional en los puntos específicos del plan minero que se determinaron anteriormente.

3.2 Modelo de incertidumbre operacional DSIm Open Pit

La generación del modelo de incertidumbre operacional se basa en el simulador DSIm Open Pit, el cual fue desarrollado en el Laboratorio de planificación minera Delphos del Departamento de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

DSIm Open Pit es una herramienta de planificación que permite estimar la producción de un plan minero a partir de los siguientes tres elementos básicos: el *layout* de la mina, la flota de equipos de

carga y transporte y un plan que indica cuánto se desea enviar desde cada frente a cada potencial destino. A partir de estos elementos, DSim Open Pit realiza una simulación del manejo de materiales, entregando reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo.

El diagrama de la Figura 3.5 muestra los distintos componentes del simulador, tanto *inputs* como resultados de la simulación.



Figura 3.5: Descripción simulador DSim Open Pit.

Fuente: Laboratorio de Planificación minera Delphos, 2015.

El simulador del sistema de manejo de materiales de una mina a cielo abierto DSim Open Pit es desarrollado en el lenguaje de programación Python y utiliza los módulos de visualización VPython y el módulo de simulación de eventos discretos SimPy.

La librería se accede mediante una interfaz gráfica y archivos Excel que permiten configurar su uso y generar los reportes correspondientes. El *software* se puede adaptar a las necesidades de los usuarios tanto en la entrada de datos como en los reportes.

De acuerdo al plan minero realizado determinísticamente, se obtienen los componentes mineros del sistema, los cuales son ingresados en el simulador. Estos componentes mineros son:

- Frentes de carga
- Frentes de descarga

- Equipos de carguío
- Equipos de transporte
- Caminos
- Enlaces

Luego de la descripción de los componentes mineros señalados anteriormente, se debe evaluar un modelo de ausencia de operación de los componentes mineros, que consiste en la manera en que se generan los intervalos de tiempo en que el componente minero está en ausencia de producción (Manríquez, 2015). 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.

De acuerdo a los datos históricos para los componentes mineros, se determinan distribuciones de probabilidad para la ausencia de operación. Al simulador se le puede ingresar un valor fijo de tiempo de ausencia de operación o una distribución de acuerdo a datos históricos.

Para poder utilizar el simulador, se debe describir además el plan de producción que se quiere estudiar. En esta descripción se debe incluir los equipos de carguío que se asignan a cada frente, los destinos de mineral de cada frente, los criterios de congestión por frente de carguío, la cantidad de material que tiene la frente, la topografía, prioridad, número máximo de camiones, tiempo de posicionamiento de los equipos de carguío y el tiempo máximo de trabajo por frente.

La Figura 3.6 muestra la interfaz gráfica del simulador con la topografía incluida. Se forma una imagen 3D con los equipos de transporte, carguío, topografía, caminos, intersecciones y frentes de descarga.

Luego de tener la descripción total de los componentes mineros y del plan, se debe seleccionar la cantidad de realizaciones que se generarán con el simulador con el objetivo de obtener una distribución de probabilidad con respecto a la cantidad de mineral asociado al plan de producción y con esto cuantificar las consecuencias que se generan a partir de las incertidumbres operacionales identificadas.

La primera etapa para la utilización del simulador consiste en la identificación de los distintos tipos de incertidumbres operacionales junto con la caracterización de los parámetros operacionales del sistema minero en estudio y con esto seleccionar la distribución que mejor representa a cada incertidumbre. Debido a que este proceso también se realiza en el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM, la selección de distribuciones de probabilidad se realiza solo una vez.

En base al caso de estudio, se determina el tiempo que se desea simular con respecto al plan de producción evaluado. Para poder hacer comparaciones entre los modelos de GEM|REEM y la simulación, se establecen varios puntos en el plan quinquenal en donde se comparan los resultados obtenidos por ambos modelos, con tal de poder hacer un análisis de los resultados.



Figura 3.6: Visualización 3D DSim Open Pit.

Fuente: DSim Open Pit, 2015.

A partir de los resultados obtenidos por medio de cada uno de los modelos de incertidumbre, se realiza una comparación de resultados, haciendo un análisis de estos y sacando conclusiones acerca de las distintas metodologías existentes en la evaluación de incertidumbres operacionales.

4 Caso de estudio

En esta sección se describe el caso de estudio utilizado para la implementación de las dos metodologías de evaluación y análisis de incertidumbre, centrado en la incertidumbre operacional para un plan minero quinquenal fijo. El caso de estudio corresponde a una mina a cielo abierto, donde el producto principal de extracción es cobre, con subproducto molibdeno. Los minerales que se extraen son principalmente sulfuros de cobre, los cuales son tratados para generar concentrado de cobre. Los sulfuros de baja ley son depositados en pilas, las cuales son lixiviadas para obtener el cobre contenido en ellas y generar cátodos de cobre.

El plan de producción estudiado es el plan quinquenal desarrollado por la empresa minera, el cual corresponde al periodo 2016 – 2020. Debido a temas de confidencialidad de la información, los datos mostrados a continuación han sido modificados, pero se ha respetado el comportamiento y escala de los datos originales, con tal de que los resultados y análisis de estos estén en línea con los obtenidos con los datos originales, dando validez al estudio realizado en esta memoria de título.

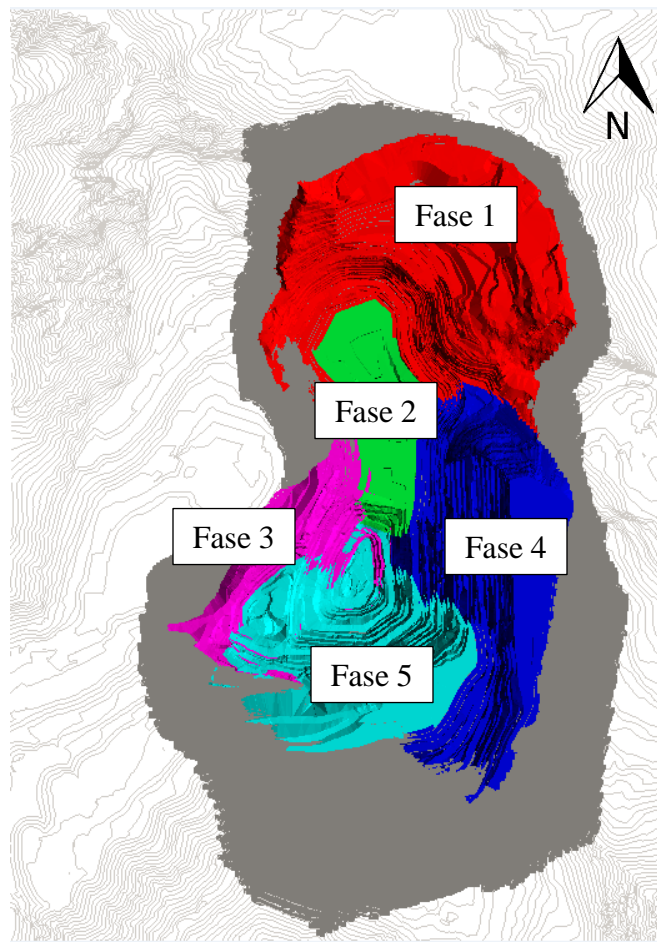


Figura 4.1: Fases activas plan de producción quinquenal 2016 - 2020. Vista en planta.

Fuente: Empresa minera, 2015.

Durante el periodo 2016 – 2020 se encuentran cinco fases activas de la mina, como se puede observar en la Figura 4.1. Estas fases han sido renombradas pero esto no representa ningún impedimento para el análisis de la información obtenida.

La Figura 4.2 muestra el movimiento de material del plan de producción quinquenal desarrollado por la empresa minera, el cual consta de 36 periodos, los años 2016 y 2016 con una descripción mensual y los periodos desde el 2018 constan de la producción por tres meses.

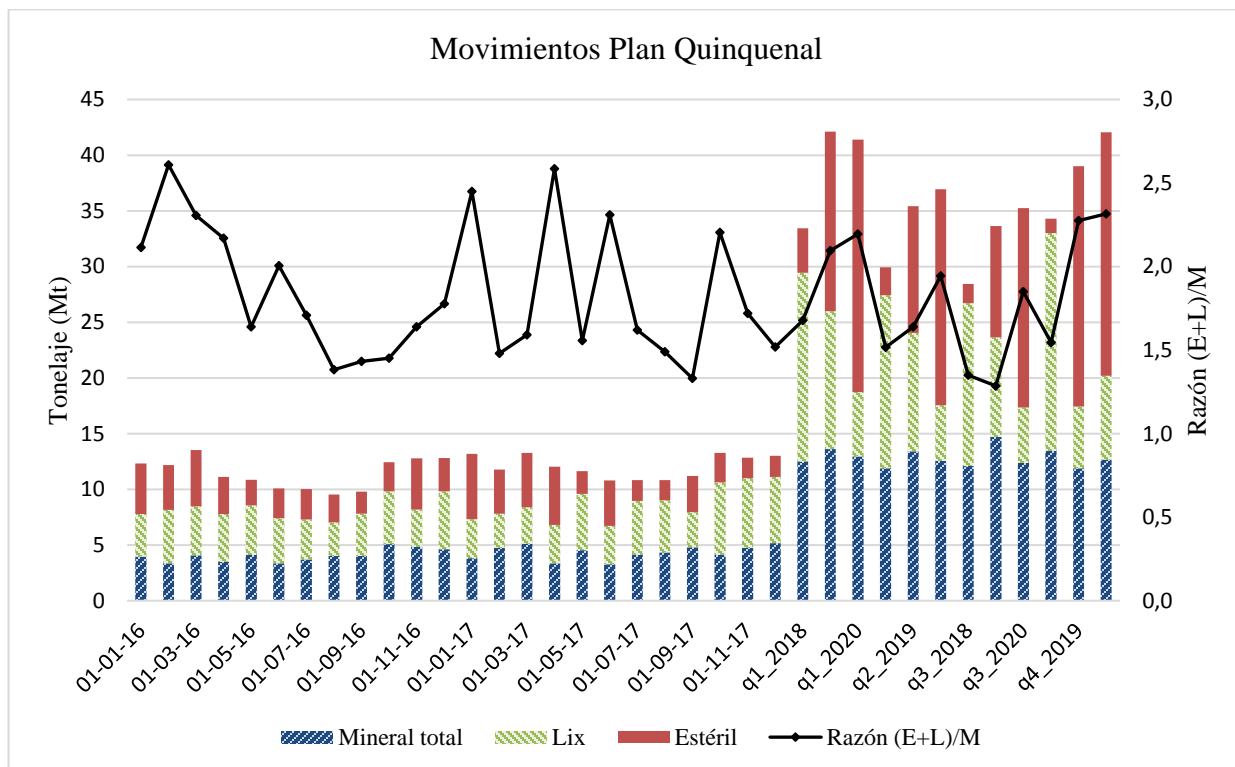


Figura 4.2: Movimiento material mina plan quinquenal.

Fuente: Empresa minera, 2015.

Cada una de las fases es explotada tanto en simultáneo como en desfase con respecto a las otras fases de extracción. Las figuras Figura 4.3 y Figura 4.4 muestran los periodos de extracción para cada una de las fases que están activas durante el plan de producción quinquenal 2016 – 2020 según tipo de material movido durante cada periodo.

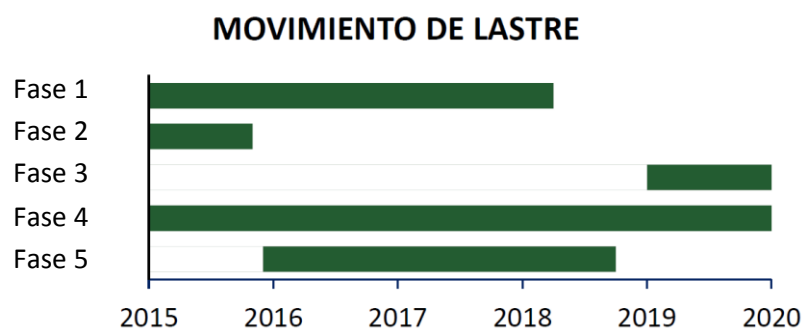


Figura 4.3: Movimiento de lastre por fase.

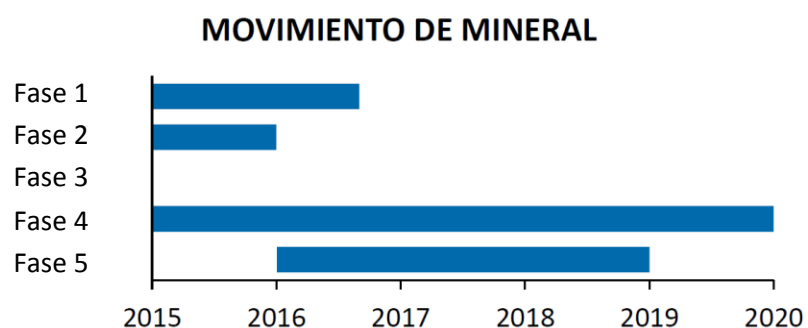


Figura 4.4: Movimiento de mineral por fase.

Fuente: Empresa minera, 2015.

El plan de producción estudiado tiene una descripción de movimiento de material por fase y por tipo de material. En la Tabla 4-1 se muestra un resumen del plan de producción quinquenal realizado por la empresa.

Tabla 4-1: Resumen plan de producción quinquenal 2015 – 2020.

| | |
|----------------------------|-------|
| Mineral total [Mt] | 255 |
| Tratamiento por día [ktpd] | 142,2 |
| Estéril total [Mt] | 229 |
| Lix total [Mt] | 229 |
| Razón (E+L)/M total | 1,8 |

Fuente: Empresa minera, 2015.

El tonelaje de las fases activas durante el periodo 2015 – 2020 según el plan se muestra en la Tabla 4-2 a continuación.

Tabla 4-2: Tonelaje de fases activas.

| | |
|-------------|-------|
| Fase 1 [Mt] | 159,3 |
| Fase 2 [Mt] | 20,2 |
| Fase 3 [Mt] | 107,2 |
| Fase 4 [Mt] | 352,0 |
| Fase 5 [Mt] | 97,7 |

Fuente: Empresa minera, 2015.

El carguío de material dentro de la mina se realiza por medio de palas hidráulicas y eléctricas, siendo la mayoría de ellas palas eléctricas. El transporte se realiza por medio de camiones de alto tonelaje, conformado por tres flotas de camiones de distintas capacidades de carga.

Los tipos de material que componen los polígonos de extracción son tanto de mineral como de estéril. El mineral de alta ley va a chancado o a *stock* de continuidad, mientras que el mineral de baja ley va a pilas de lixiviación y el estéril se dirige a botaderos.

Debido a que el análisis se realiza para los meses de enero 2016 y enero 2017, la Tabla 4-3 a continuación muestra el plan definido para ambos meses, con una descripción del movimiento total y el mineral enviado a chancado. En el apartado de Anexos se muestra el plan quinquenal completo para el movimiento mina y el mineral enviado a chancado.

Tabla 4-3: Plan de producción enero 2016 y enero 2017.

| Periodo | Mineral a chancado (kt) | Lix (kt) | Estéril (kt) | Producción total mensual (kt) |
|------------|-------------------------|----------|--------------|-------------------------------|
| Enero 2016 | 3.538 | 3.837 | 4.531 | 12.326 |
| Enero 2017 | 3.790 | 3.508 | 5.859 | 13.191 |

Fuente: Empresa minera, 2015.

4.1 Caso de estudio modelo GEM|REEM

Debido a que la herramienta desarrollada por la empresa de ingeniería GEM fue creada para el plan de producción quinquenal, durante la simulación se consideran los primeros dos años en base mensual y los siguientes tres años en base trimestral, dando un total de 36 periodos en evaluación. Se consideran las 5 fases activas además del stock de continuidad, donde cada una de ellas tiene especificado el destino de cada material. Los destinos son chancador, pilas de lixiviación y botaderos.

Adicionalmente, este modelo contiene los parámetros económicos que son los utilizados por la empresa minera, los cuales no son modelados, solo se utilizan para la obtención del VAN esperado para el plan de producción estudiado. La Figura 4.5 muestra el precio de cobre y molibdeno utilizados para la evaluación del plan quinquenal.

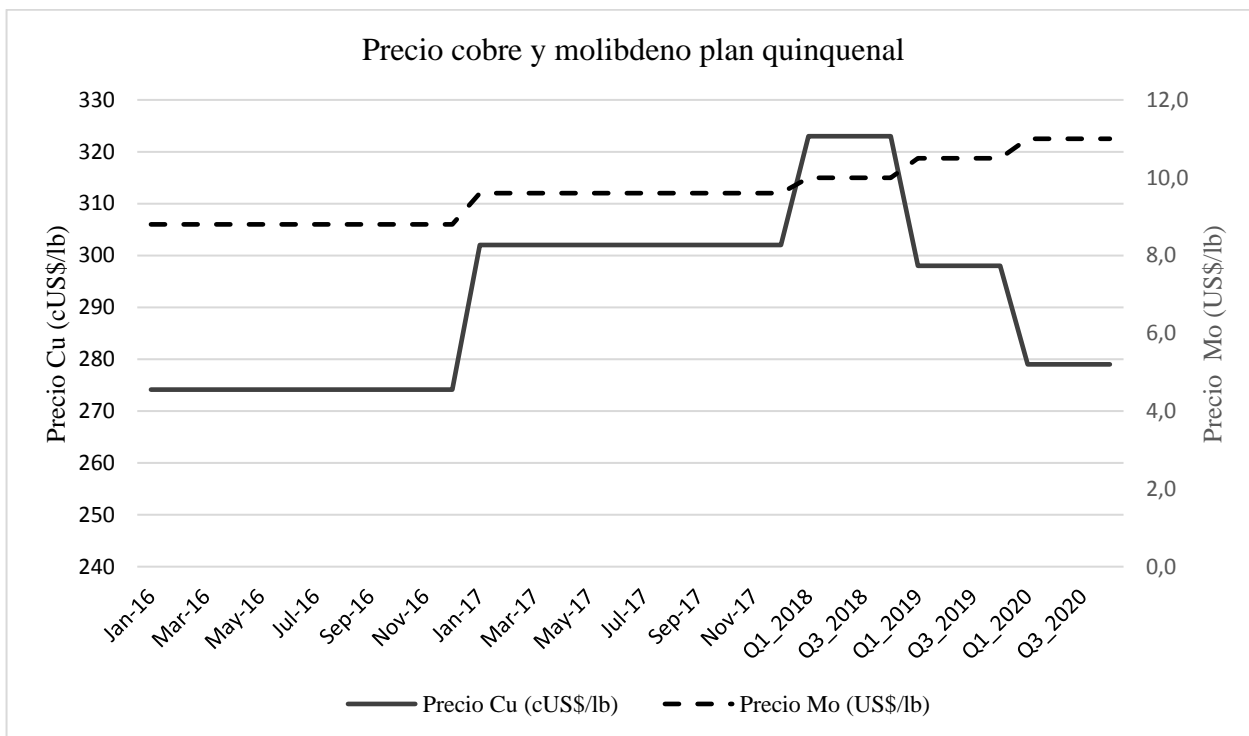


Figura 4.5: Gráfico precio de cobre y molibdeno para plan quinquenal.

Fuente: Empresa minera, 2015.

4.1.1 Identificación de incertidumbres

La identificación de las incertidumbres más relevantes para el cumplimiento del plan de producción fue realizada por personas de la empresa, tanto gerentes como personal experto, con tal de incluir visiones desde el punto de vista del negocio como operativas. La recopilación de la información fue realizada por la empresa de ingeniería GEM. Fueron identificadas más de 80 incertidumbres que impactan en la operación, las cuales fueron clasificadas según su índice de ocurrencia y consecuencia para luego categorizarlas en una matriz de relevancia. La Tabla 4-4 muestra algunas de las incertidumbres identificadas.

Tabla 4-4: Incertidumbres relevantes identificadas

| | |
|----|---|
| 1 | Precio del cobre e insumos |
| 2 | Cambio en la regulación de glaciares |
| 3 | Disponibilidad de agua |
| 4 | Cierre de botadero Fase 1 Norte |
| 5 | Conflictividad laboral |
| 6 | Modificación límite cráter |
| 7 | Variables geometalúrgicas de Fase 4 |
| 8 | Restricciones de caja |
| 9 | Huelga en negociación colectiva 2016 |
| 10 | Falta de experiencia en operaciones invierno |
| 11 | Disponibilidad de la correa overland |
| 12 | Grave accidente en la G21 |
| 13 | Riesgo en los accesos industriales y mina |
| 14 | Riesgo aluvión |
| 15 | Precio TC-RC |
| 16 | Tipo de cambio |
| 17 | Días de invierno y días de deshielo |
| 18 | Capacidad de transporte de concentrado a puerto |
| 19 | Problemas estructurales geotécnicos severos |
| 20 | Problema de continuidad de alimentación a planta Fase 4 |
| 21 | Situación del tranque |
| 22 | Utilización efectiva del sistema Chanchado-Correa |
| 23 | Capacidad de stock pile (distancia de transporte) |
| 24 | Calidad de modelo KPI mina |

Fuente: GEM, 2015.

4.1.2 Cuantificación de incertidumbres

Luego de la identificación, viene la etapa de cuantificación de las incertidumbres, la cual consta de dos procesos; definir la probabilidad de ocurrencia asociada a cada incertidumbre relevante (determinando y/o ajustando una distribución de probabilidades o un proceso estocástico) y determinar el efecto que tiene la incertidumbre sobre el plan.

Los tipos de cuantificación de incertidumbre son objetiva, subjetiva y mixta. La cuantificación objetiva es aquella que está basada en datos históricos, bajo el supuesto de que estos representan de buena manera el comportamiento futuro. La cuantificación subjetiva es la que está basada en juicio de experto, mientras que la cuantificación mixta es aquella que incluye componentes tanto objetivas como subjetivas.

Los datos analizados son del periodo 2013 – 2015 en base mensual. Esta información se ingresa como *input* a la herramienta GEM|REEM. La Tabla 4-5 muestra las distribuciones de probabilidad asociadas a cada de las incertidumbres consideradas junto con los parámetros que las describen.

Tabla 4-5: Distribuciones de probabilidad factores de ajuste para riesgos productivos

| Riesgos productivos | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|--|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Disponibilidad P5 | Triangular | 0,38618 | 1,065 | 1,5937 |
| Disponibilidad P6 | Triangular | 0,39597 | 1,20672 | 1,20672 |
| Disponibilidad P7 | Triangular | 0,75914 | 1,11334 | 1,62007 |
| Disponibilidad P8 | Triangular | 0,55875 | 1,21387 | 1,21387 |
| Disponibilidad P9 | Triangular | 0,094011 | 1,2861 | 1,2861 |
| Disponibilidad P10 | Triangular | 0,46078 | 1,04755 | 1,26568 |
| Disponibilidad P11 | Lognormal | 0,2756 | 0,056618 | 0,76132 |
| Disponibilidad P12 | Triangular | 0,8536 | 0,99734 | 1,15056 |
| Disponibilidad P13 | Triangular | 0,80259 | 1,16939 | 1,16939 |
| Disponibilidad P14 | Triangular | 0,78071 | 0,9988 | 1,26042 |
| Rendimiento Match P5 | Lognormal | 0,4237 | 0,12524 | 0,5725 |
| Rendimiento Match P6 | Lognormal | 0,44387 | 0,25983 | 0,47311 |
| Rendimiento Match P7 | Normal | 1,92937 | 0,94243 | - |
| Rendimiento Match P8 | Triangular | 0,59917 | 0,94944 | 0,94944 |
| Rendimiento Match P9 | Lognormal | 7,9022 | 0,11207 | -7,0471 |
| Rendimiento Match P10 | Normal | 0,85029 | 0,10595 | - |
| Rendimiento Match P11 | Triangular | 0,73315 | 0,91501 | 1,12327 |
| Rendimiento Match P12 | Triangular | 0,64985 | 0,96262 | 1,07242 |
| Rendimiento Match P13 | Triangular | 0,64234 | 0,64234 | 1,38975 |
| Rendimiento Match P14 | Triangular | 0,59684 | 0,59684 | 2,0348 |
| Disponibilidad Komatsu 930 | Triangular | 0,95853 | 1,03208 | 1,06143 |
| Disponibilidad Komatsu 830 | Triangular | 0,89673 | 1,07563 | 1,18924 |
| Disponibilidad CAT 795 | Triangular | 0,57681 | 1,05 | 1,05 |
| Rendimiento Komatsu 930 | Triangular | 0,68214 | 0,91678 | 0,96172 |
| Rendimiento Komatsu 830 | Triangular | 0,1712 | 0,78938 | 0,78938 |
| Rendimiento CAT 795 | Lognormal | 0,56582 | 0,19905 | 0,39031 |
| TPH Planta 2 | Triangular | 0,81877 | 1,08702 | 1,21181 |
| TPH Planta 1 | Triangular | 0,83847 | 1,0834 | 1,14418 |
| Dureza – Fase 4 | Triangular | 0,9 | 1 | 1,05 |
| Riesgo borde cráter | Triangular | 0,8 | 0,9 | 1 |
| Ley de alimentación Planta 2 (Normal) | Normal | 1,01513 | 0,13311 | - |
| Ley de alimentación Planta 2 (Lognormal) | Lognormal | 0,92441 | 0,13181 | 0,090749 |
| Ley de alimentación Planta 1 | Triangular | 0,76298 | 1,03444 | 1,27428 |
| Recuperación Cu – Planta 2 | Triangular | 0,91523 | 1,02292 | 1,04744 |
| Recuperación Cu – Planta 1 | Normal | 1,014353 | 0,029988 | - |

Fuente: GEM, 2015.

Para poder hacer una comparación entre las dos metodologías de análisis de riesgo, se considera solo incertidumbre operacional en el análisis, debido a que el modelo DSim Open Pit solo evalúa el tipo de incertidumbre asociada a los riesgos operacionales.

4.2 Caso de estudio modelo DSim Open Pit

El simulador DSim Open Pit fue utilizado para describir el movimiento mina en base a la presencia de incertidumbre operacional. Debido a que los frentes de carga y descarga cambian a través del tiempo, al igual que las rutas asignadas para el movimiento de material, la simulación se realiza en periodos de un mes para poder mantener constante la configuración de la mina en cada evaluación realizada.

La Figura 4.6 muestra la configuración espacial de las frentes de carga y descarga de material en la red de transporte presentada en el plan quinquenal. Debido a los altos cambios que ocurren en las rutas a través de los periodos, la figura muestra la red de transporte para el mes de enero de 2016 definida por el plan.

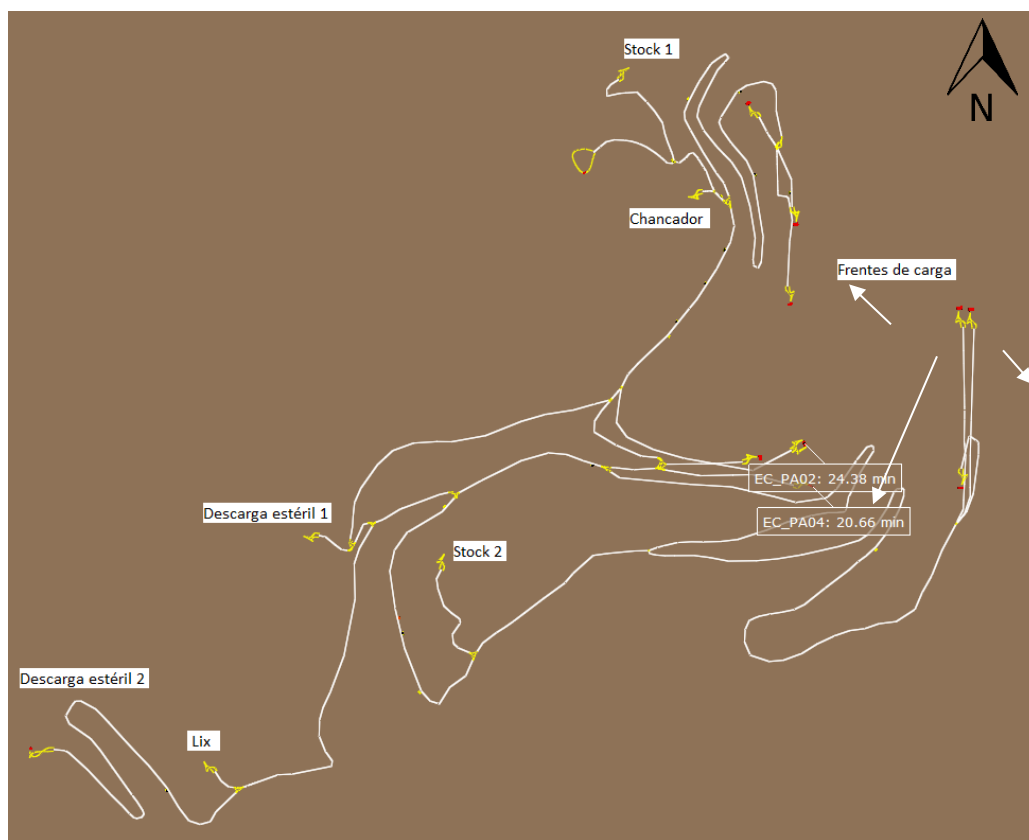


Figura 4.6: Red de transporte de material enero 2016.

Los tipos de material contenido en los puntos de extracción son tres: mineral, estéril y lix. El mineral es enviado a chancador o stock, dependiendo del plan, el estéril es enviado a los botaderos de lastre dispuestos, mientras que el material categorizado como lix es enviado a pilas, como se observa en la Figura 4.6.

Los frentes de carga dependen de la fase activa para el mes estudiado. Para el mes de enero 2016, hay tres fases activas, en donde cada una tiene polígonos de mineral, estéril y lix.

Los frentes de descarga disponibles dependen del mes en análisis, pero se dividen en chancador, stock de mineral, descarga de estéril y pilas de lix.

La cantidad y tipos de equipos de carga se obtienen del plan quinquenal, que muestra la cantidad de equipos planificados. A su vez, se muestra la cantidad de equipos de transporte por flota. La Tabla 4-6 a continuación muestra la cantidad de equipos por categoría (carga o transporte) y tipo de flota.

Tabla 4-6: Descripción equipos de carga y transporte.

| Equipo | Flota | Capacidad nominal* | Número de equipos |
|-------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|
| Carga | 495BII (PC) | 73 yd ³ | 3 |
| | PC5500 (PH) | 37 yd ³ | 3 |
| | 495HR (PC) | 60 yd ³ | 4 |
| Transporte | KOM 830E | 244 t | 8 |
| | KOM 930E | 290 t | 51 |
| | CAT 795 | 313 t | 11 |
| | KOM 960E | 360 t | 2 |

*Capacidad nominal por catálogo de equipos y datos internos de la mina. *Fuente: Empresa minera, 2015.*

Cabe destacar, que para cada mes, la cantidad de equipos de carga activos varía, la tabla anterior muestra la flota completa descrita en el plan quinquenal.

A partir de las estadísticas básicas de velocidades de los equipos de transporte, se obtiene la velocidad media aislada del camión, la cual depende del estado de carga del equipo (cargado o descargado) y de la pendiente del camino que recorre (subiendo, horizontal o bajando). Las pendientes en subida y bajada deben poseer una pendiente por sobre 4% en valor absoluto para que sean consideradas en esa condición. La Tabla 4-7 muestra las velocidades utilizadas para los equipos de transporte.

Tabla 4-7: Velocidad aislada de equipos de transporte.

| Estado del camión | Velocidad (km/h) | | |
|--------------------------|-------------------------|------------|----------|
| | Bajando | Horizontal | Subiendo |
| Cargado | 22,6 | 27 | 13,4 |
| Descargado | 24,5 | 29 | 18,9 |

Fuente: Empresa minera, 2015.

4.2.1 Descripción incertidumbre operacional

Se puede realizar una clasificación de la incertidumbre operacional presente en un sistema de manejo de materiales según la fuente de incertidumbre. Estas se pueden clasificar como las asociadas a:

- Parámetros operacionales
- Eventos operacionales
- 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 (Manríquez, 2015).

La incertidumbre operacional asociada a los parámetros operacionales se caracteriza mediante un estudio estadístico de datos a partir de los datos históricos de la faena. Las distribuciones usadas normalmente para modelar cada uno de los parámetros operacionales son las siguientes (Torkamani, 2013):

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

En la sección de Anexos se encuentran los parámetros de las distribuciones utilizadas para el ajuste de las incertidumbres operacionales utilizadas.

Por otro lado, la incertidumbre operacional asociada a eventos operacionales, tiene que ver con la interrupción en la operación de los componentes mineros. La naturaleza de la interrupción tiene que ver con:

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

La incertidumbre operacional asociada a reasignaciones operacionales ocurre debido a un cambio de estado en el sistema minero. La reasignación entrega el nuevo estado operativo ante el cambio operacional, que viene dado por reglas que generalmente son generadas por las personas a cargo de la reasignación de los equipos.

La Figura 4.7 muestra el esquema global para la identificación y cuantificación de los distintos tipos de incertidumbre operacional.

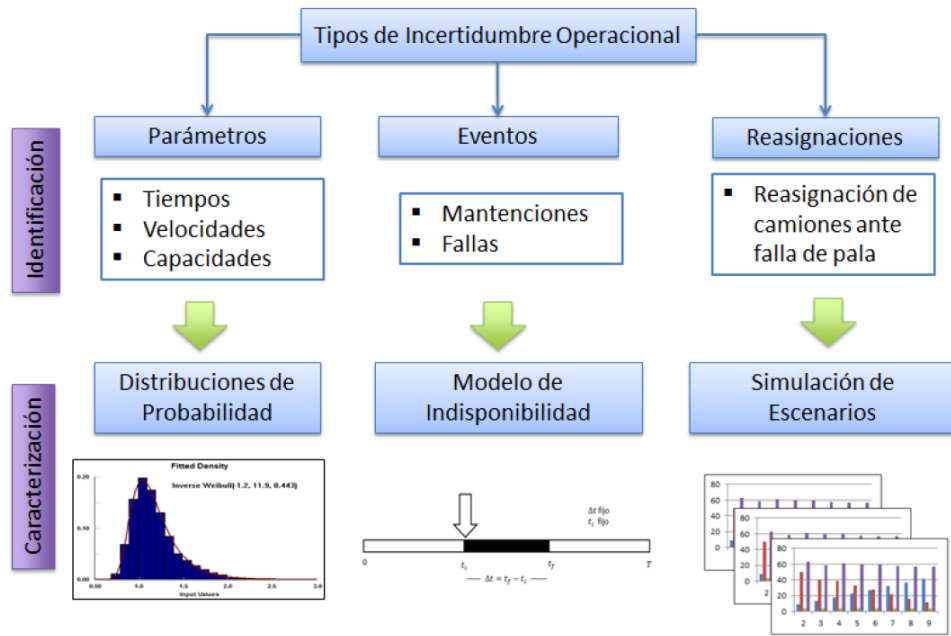


Figura 4.7: Caracterización por tipo de incertidumbre operacional.

Fuente: Manríquez, 2015.

5 Resultados y discusión

En este capítulo se describen los resultados generados a partir de la información facilitada por la empresa minera. El capítulo es dividido en dos partes principales, las cuales tienen relación con las metodologías de evaluación de riesgo estudiadas. La primera parte muestra los resultados generados para el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM evaluando la incertidumbre operacional y el segundo apartado muestra los resultados del modelo de simulación DSim Open Pit.

La comparación entre ambas metodologías se realiza en puntos específicos del plan quinquenal debido a que el método de simulación DSim Open Pit tiene una escala diaria, por lo que al intentar hacer una estimación del plan quinquenal completo se debe incurrir en un alto gasto de tiempo computacional además de la realización de una planificación diaria de todo el plan quinquenal, por lo que se dejó fuera del alcance de este trabajo. Los puntos analizados en ambas metodologías fueron los meses de enero 2016 y enero 2017. A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambos modelos de análisis.

5.1 Modelo de gestión de riesgos GEM|REEM

5.1.1 Análisis de convergencia modelo de gestión de riesgos GEM|REEM

Como parte de la validación del modelo de gestión de riesgos GEM|REEM, se realiza un análisis de convergencia. Este análisis consta de la comparación de medias y varianzas de la producción de cobre para el plan quinquenal. Los resultados son obtenidos como distribuciones, generados por tres escenarios: 100, 500 y 1.000 realizaciones.

La Tabla 5-1 muestra la media, desviación estándar y varianza de la producción total de cobre para el plan quinquenal en los tres casos analizados.

Tabla 5-1: Producción de cobre total para el plan quinquenal. Estimado con 100, 500 y 1.000 realizaciones.

| Estadístico | 100 Simulaciones | 500 Simulaciones | 1.000 Simulaciones |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Media | 1.579 | 1.579 | 1.579 |
| Desviación estándar | 5,1 | 4,9 | 4,8 |
| Varianza | 26,0 | 23,6 | 22,7 |

Las figuras Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3 muestran los histogramas obtenidos en los casos de 100, 500 y 1000 realizaciones, respectivamente, para la estimación de la producción de cobre en el plan quinquenal.

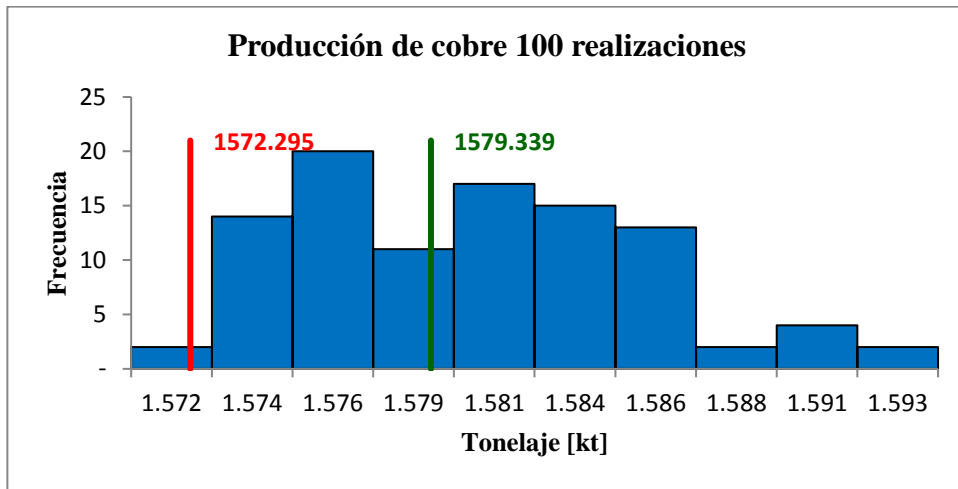


Figura 5.1: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 100 realizaciones.

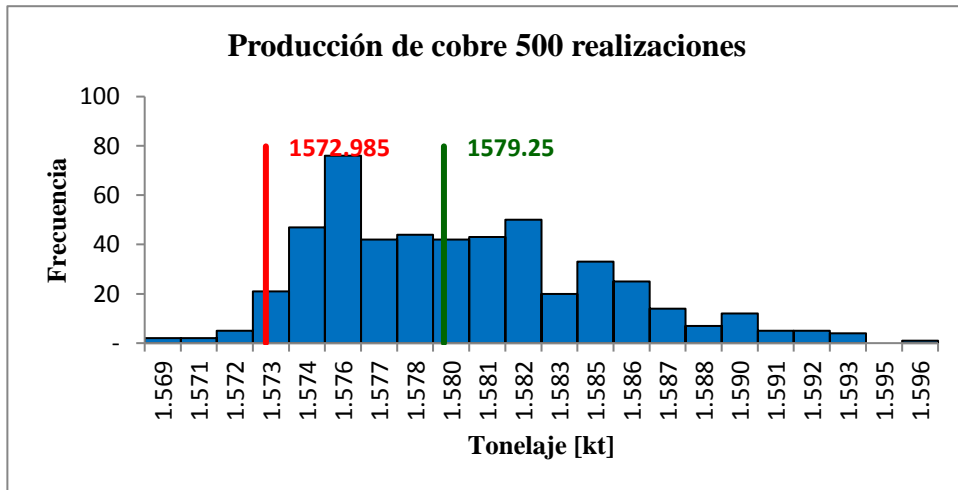


Figura 5.2: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 500 realizaciones.

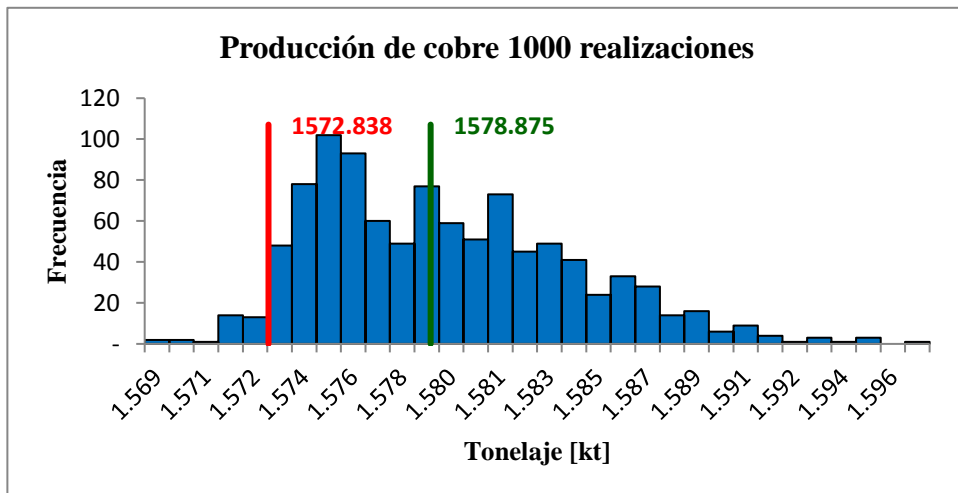


Figura 5.3: Histograma estimación de la producción de cobre del plan quinquenal con 1000 realizaciones.

De los histogramas y datos mostrados anteriormente se puede observar que entre los tres casos analizados, la media varía alrededor de un 0,03% entre el caso de 100 simulaciones y el de 1000 simulaciones y un porcentaje aún menor entre el caso de 500 simulaciones y los otros dos casos mencionados. Se puede ver además, que la desviación estándar y la varianza disminuyen a medida que aumenta el número de realizaciones, resultado esperable al aumentar la cantidad de iteraciones para variables aleatorias.

De los resultados anteriores se puede decir que no hay variación significativa de los estadísticos principales a mayor número de simulaciones. Esto se debe a que la herramienta GEM|REEM busca cumplir el plan de producción dado como *input*, por lo que los casos que dan alta o baja producción los va ajustando de manera de acercarse al plan, suavizando el resultado final de la simulación. Otra razón se debe a que hay poca variabilidad entre una simulación u otra debido a que las distribuciones de las variables aleatorias no generan casos extremos.

Debido a que el cambio en los estadísticos principales varía menos de un 0,1% entre 100 y 1000 simulaciones para un mismo caso, se realizan los resultados con 100 simulaciones para cada caso analizado.

5.1.2 Resultados modelo de gestión de riesgos GEM|REEM

Para lograr una comparación entre ambos modelos, los resultados del modelo GEM|REEM fueron generados acorde a los alcances del simulador DSim Open Pit. Se consideran los movimientos desde banco a destino final, sin remanejos de *stock* de mineral u otros remanejos considerados en el modelo GEM|REEM, debido a que este representa menos del 4,5% del movimiento total para el plan quinquenal, un 2,4% para el mes de enero 2016 y un 5% para el mes de enero 2017. Debido a su importancia para el negocio, se analiza además la cantidad de mineral que va desde banco al chancador, obteniéndose el mineral enviado a planta.

A continuación se muestran los resultados productivos para enero 2016 y enero 2017 obtenidos con el modelo GEM|REEM. Se realizaron 100 simulaciones para cada caso incluyendo solo las distribuciones de probabilidad de las incertidumbres operacionales que se muestran en la Tabla 4-5.

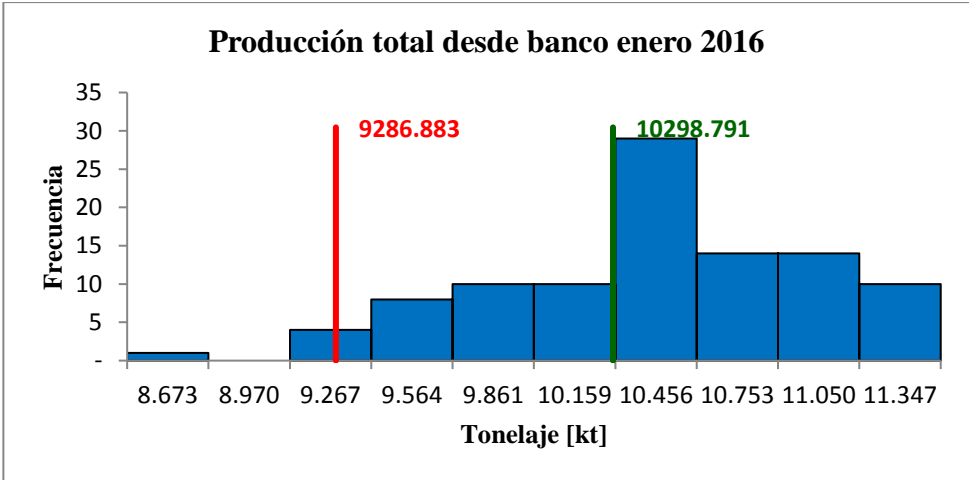


Figura 5.4: Histograma de producción total desde banco para enero 2016. Modelo GEM|REEM.

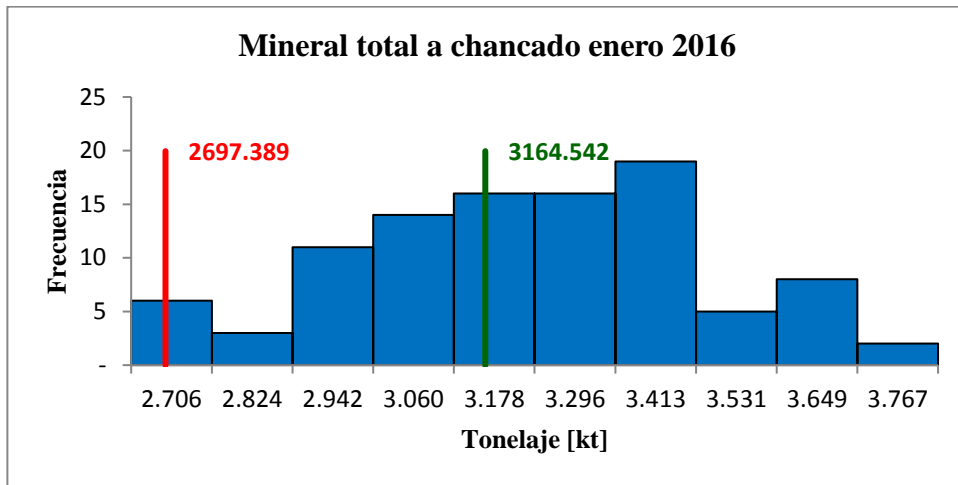


Figura 5.5: Histograma de mineral total a chancado para enero 2016. Modelo GEM|REEM.

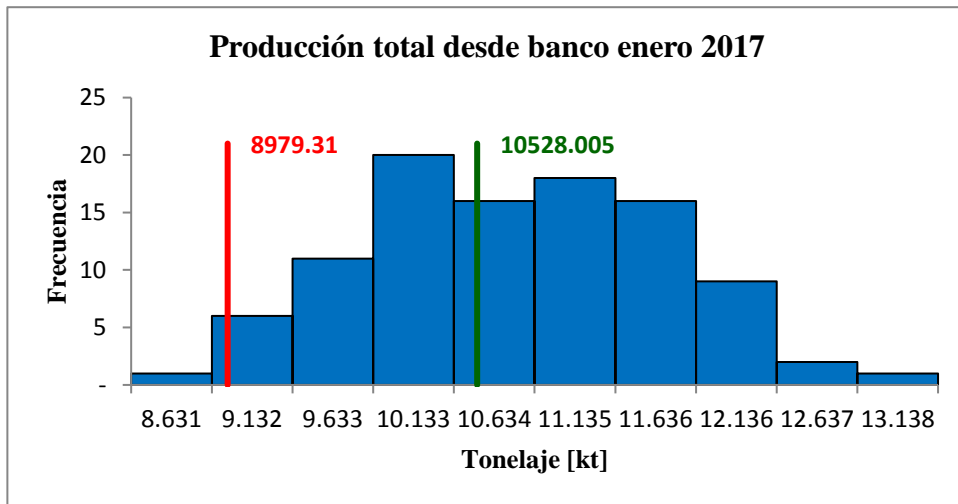


Figura 5.6: Histograma de producción total desde banco para enero 2017. Modelo GEM|REEM.

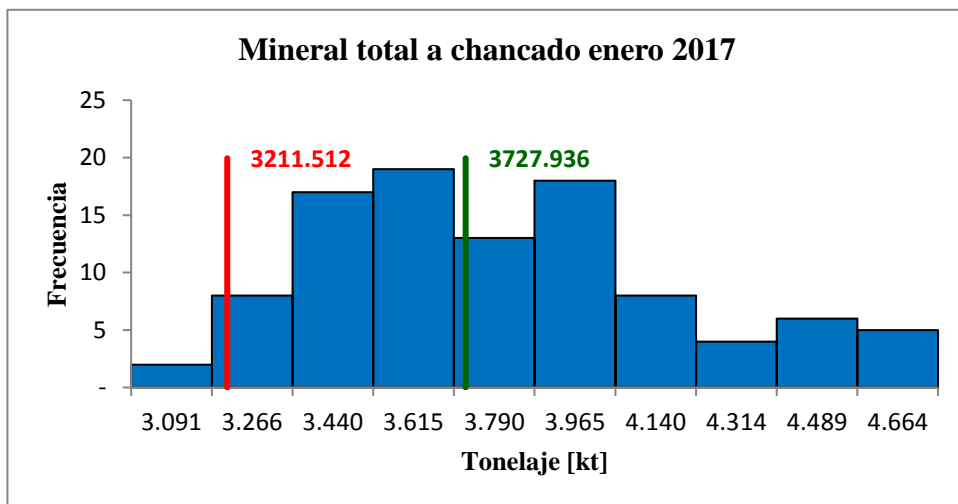


Figura 5.7: Histograma de mineral total a chancado para enero 2017. Modelo GEM|REEM.

Los estadísticos principales para la producción total desde banco y mineral enviado a chancado para los meses de enero 2016 y enero 2017 se muestran a continuación en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Resultados modelo GEM|REEM para producción enero 2016 y enero 2017.

| Estadístico | Enero 2016 | | Enero 2017 | |
|----------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| | Producción total desde banco | Mineral a chancado | Producción total desde banco | Mineral a chancado |
| Media (kt) | 10.299 | 3.165 | 10.528 | 3.727 |
| Desv. Estándar (kt) | 584 | 261 | 937 | 392 |
| Mínimo (kt) | 8.376 | 2.588 | 8.130 | 2.915 |
| Máximo (kt) | 11.346 | 3.767 | 13.137 | 4.663 |

La Tabla 5-3 muestra la producción total a banco y el mineral enviado a chancado para los meses de enero 2016 y enero 2017 del plan de producción brindado por la empresa minera. En la misma tabla se muestra la media de los mismos parámetros obtenidos por GEM|REEM.

Tabla 5-3: Resultados GEM|REEM versus plan de producción determinístico.

| | Enero 2016 | | Enero 2017 | |
|---|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) |
| Valores plan quinquenal | 12.326 | 3.538 | 13.191 | 3.790 |
| Media resultados GEM REEM | 10.299 | 3.165 | 10.528 | 3.728 |
| Diferencia entre plan y GEM REEM (%) | 16,4 | 10,6 | 20,2 | 1,6 |

De los resultados anteriores, se puede observar que tanto para la producción total desde banco como para mineral enviado a chancado, la media obtenida con GEM|REEM es menor a los valores presentados en el plan de producción quinquenal determinístico. Según la distribución de datos obtenida, la producción total desde banco planteada por el plan supera el máximo valor simulado con GEM|REEM, es decir, no se alcanza el plan bajo ningún escenario considerando incertidumbre operacional. Sin embargo, el mineral a chancado presentado por el plan de producción está dentro de la distribución de datos obtenida con GEM|REEM. De esto, se puede decir que el plan de producción de material desde banco es muy optimista con respecto a los resultados históricos de la faena, sin embargo, debido a la alta prioridad que se le da al mineral enviado a chancado, el plan de producción para mineral tiene una alta probabilidad de cumplirse según los datos obtenidos con el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM. Al priorizar el movimiento de mineral por sobre

otros destinos, perjudica la alimentación a planta en el largo plazo, ya que el material retrasado por la priorización de mineral debe moverse para poder seguir avanzando en el desarrollo del pit, lo que perjudica la REM en el plan de producción, comprometiendo el mineral a futuro.

5.2 Modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit

5.2.1 Validación modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit

Para este caso, se realiza una primera etapa de verificación y validación del modelo de simulación con el fin de tener referencia con respecto a un resultado operacional real y hacer una calibración del modelo con respecto a la realidad de la faena.

Para realizar la calibración, se toman como referencia los resultados operacionales del mes de septiembre 2015, en particular, se realiza la simulación para el día primero del mes. Para realizar esto, se trabaja con la planificación diaria de la faena, que para el mes de septiembre, está contenida en el Outlook 8+4 actualizado al mes de septiembre. Este plan consta de la planificación diaria del mes en cuestión, considerando distribución de equipos y destinos. Como el modelo DSim Open Pit considera una escala de tiempos de segundos, el plan utilizado tuvo el detalle del Outlook proporcionado por la empresa minera con tal de darle un destino al mineral según el lugar de cada equipo de carguío y hacer que la simulación diaria fuera lo más parecido a la planificación propuesta por el plan.

Debido a que la calibración se realiza para un día, los equipos de carguío se mantienen en la misma frente durante la simulación.

Las distribuciones ocupadas son las obtenidas a partir de datos históricos de la faena y valores estándar de operación.

Se realizaron 100 simulaciones con tal de obtener una distribución del tonelaje para el día caracterizado. Debido a que no se consideran remanejos en las simulaciones realizadas, se compara el mineral a chancado extraído de fase simulado versus el tonelaje real enviado a planta desde banco. La Figura 5.8 muestra el mineral enviado a chancado real y el promedio obtenido de las 100 simulaciones para el mineral extraído de fase a chancado.

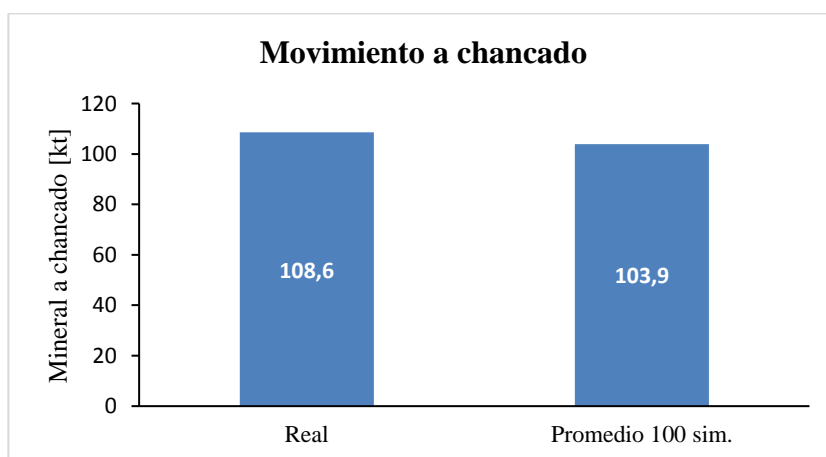


Figura 5.8: Movimiento de mineral a chancado real versus promedio 100 simulaciones.

A partir de los datos obtenidos, se calcula la diferencia en tonelaje y porcentual entre el caso real y el promedio de las 100 simulaciones. La Tabla 5-4 muestra los valores obtenidos.

Tabla 5-4: Comparación mineral a chancado real versus promedio 100 simulaciones.

| | |
|--|-----|
| Total a chancado real (kt) | 109 |
| Total a chancado promedio 100 simulaciones (kt) | 104 |
| Diferencia en tonelaje (kt) | 4,7 |
| Diferencia porcentual (%) | 4,3 |

De los resultados anteriores se puede observar que el promedio obtenido de las 100 simulaciones tuvo una desviación menor al 5% con respecto al movimiento real. Este valor indica que con los parámetros utilizados en DSim Open Pit, los resultados obtenidos a partir de ellos pueden tener una desviación de la realidad de menos de un 5%. Es importante destacar que el movimiento planificado según Outlook 8+4 actualizado al mes de septiembre, tuvo una desviación con respecto a los resultados reales de 8,2%, por lo que el simulador DSim Open Pit representa de buena manera la operación minera.

Las diferencias obtenidas con respecto a la realidad pueden deberse a los cambios en la planificación de acuerdo a lo que sucede en el día a día de la operación. Al realizar esta planificación cada cuatro meses, existen desviaciones de lo planificado con lo real por contingencias que pueden ocurrir en la faena, desviándose de lo estipulado en el plan. Además, debido a que la asignación final de los equipos lo gestionan personas de acuerdo a la realidad diaria de la mina, puede haber grandes desviaciones con respecto a lo planificado a una escala operacional diaria como la analizada en este segmento.

Para disminuir la diferencia entre la planificación de corto plazo (diaria) a lo obtenido en la realidad, dentro del análisis se puede considerar contingencias y su periodicidad histórica. Un caso puede ser la detención no programada de un chancador, tiempo que no es considerado dentro del simulador DSim. Esta detención provoca cambios significativos en la operación pala/camión, ya que el mineral puede ser enviado a stock y no a planta.

Otro factor que puede ser relevante, son los atrasos con respecto al día (semana) anterior a lo simulado. Como se dijo anteriormente, al utilizar el plan de cuatro meses (con especificación diaria) no recoge los atrasos reales anteriores al día estudiado. Ajustes para cumplir con los atrasos puede cambiar los destinos y cantidades de material movido en la mina para cumplir con la planificación de mediano plazo.

5.2.2 Análisis de convergencia simulador DSim Open Pit

Para el simulador DSim Open Pit, se evalúa la convergencia a la media en 100 simulaciones para los meses estudiados (enero 2016 y enero 2017) y así obtener el número de simulaciones necesarias para asegurar la convergencia a la media.

La Figura 5.9 muestra el movimiento total para 100 simulaciones para el mes de enero de 2016. Se puede observar que la variación porcentual para más de 60 simulaciones es menos al 0,2%.

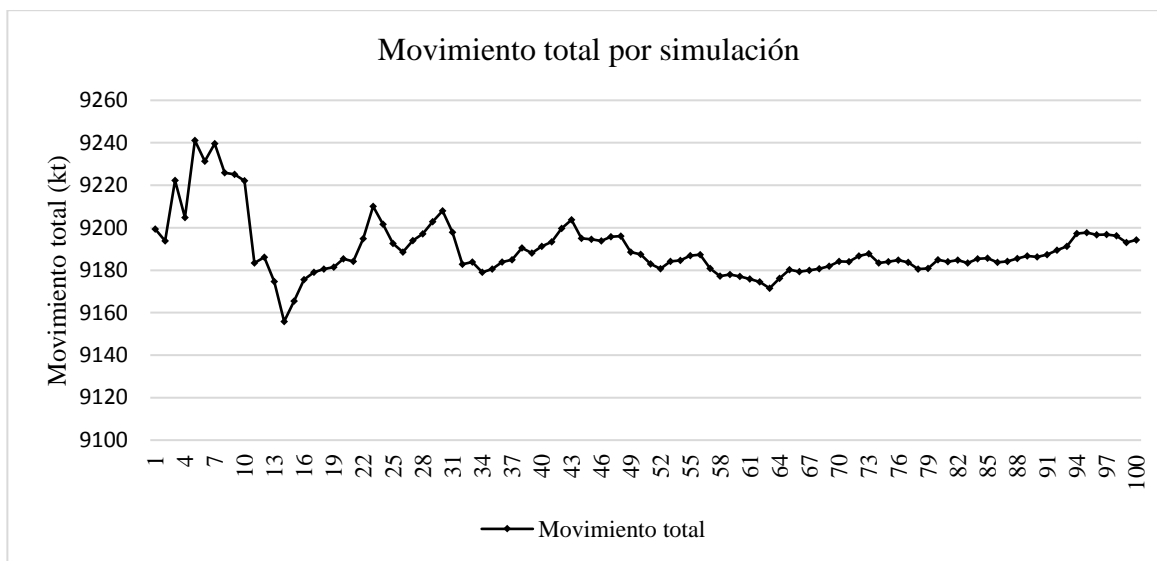


Figura 5.9: Movimiento total enero 2016 para 100 simulaciones.

La Figura 5.10 muestra el mineral enviado a chancado para 100 simulaciones para el mes de enero de 2016. Se puede observar que la variación después de la simulación 50 es menor al 0,3%.

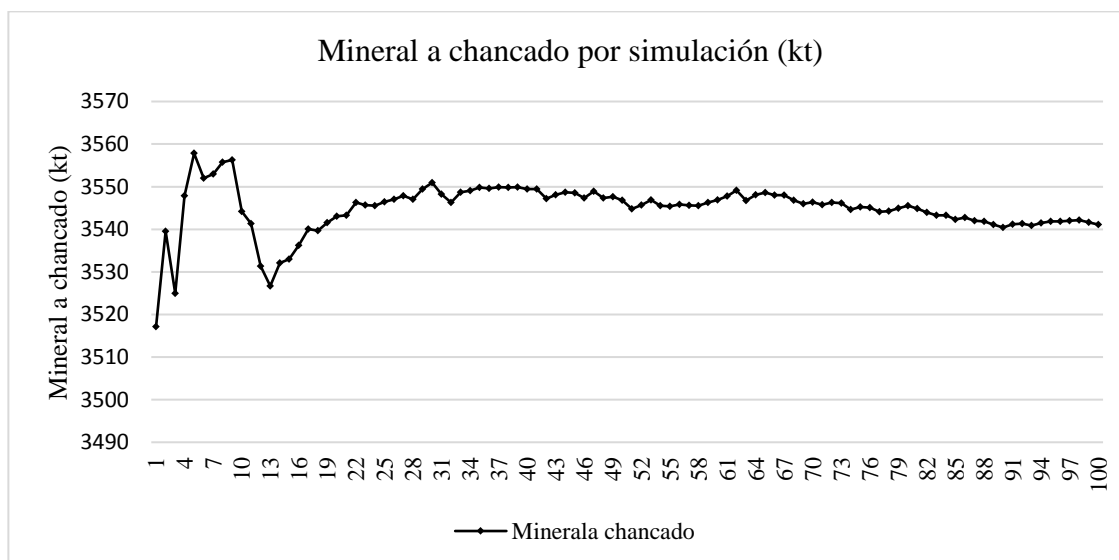


Figura 5.10: Mineral a chancado enero 2016 para 100 simulaciones.

Los resultados anteriores muestran una convergencia a la media después de las 60 simulaciones para ambos casos con una diferencia porcentual menor al 0,3%. Esto indica que realizar 100 simulaciones para cada caso estudiado es suficiente para que exista convergencia a la media en los resultados.

5.2.3 Caracterización de distribuciones de parámetros operacionales

Para la utilización del simulador DSim Open Pit, se deben construir las distribuciones de probabilidad de los parámetros operacionales considerados. A continuación, se muestran los valores de las distribuciones obtenidas para los distintos parámetros. Los histogramas experimentales y distribuciones de probabilidad para cada factor se encuentran en la sub sección Anexo C de este mismo documento. Los parámetros de cada distribución se encuentran en la misma sección del Anexo C.

Con la información histórica proporcionada por la mina, se generan las distribuciones de probabilidad necesarias para la simulación. Debido a que se busca realizar una validación de los resultados obtenidos con el modelo GEM|REEM, los datos históricos utilizados para la obtención de las distribuciones son los mismos que se utilizaron en este modelo, el cual considera información de la faena desde el año 2013 hasta el año 2015, con una escala mensual de los valores. Cabe destacar, que para la validación del modelo de simulación DSim Open Pit se consideraron las distribuciones tanto en base mensual como diaria, donde no se obtuvieron diferencias significativas entre los resultados, por lo tanto, se utilizó la escala mensual al igual que para el modelo GEM|REEM.

5.2.3.1 Factor de carga

Se obtienen las distribuciones de probabilidad para el factor de carga (FC) de las cuatro flotas de equipos de transporte presentes en la mina. La Tabla 5-5 muestra los parámetros obtenidos para cada flota.

Tabla 5-5: Distribuciones de probabilidad. Factor de carga equipos de transporte.

| Flota equipo de transporte | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 930 | Uniforme | 279 | 305 | – |
| 830 | Weibull | 225 | 1,69 | 13,4 |
| 795 | Weibull | 304 | 1,28 | 16,9 |
| 960 | Weibull | 279 | 1,99 | 25,2 |

5.2.3.2 Habilitación equipos de transporte

La habilitación de los equipos tanto de transporte como de carguío se calcula en base al tiempo efectivo de utilización del equipo adicionando pérdidas operacionales (colaciones, cambio de turnos sobre el tiempo nominal del equipo. La Tabla 5-6 muestra las distribuciones obtenidas para la habilitación de los equipos de transporte por flota.

Tabla 5-6: Distribuciones de probabilidad. Habilitación equipos de transporte.

| Flota equipo de transporte | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 930 | Weibull | 45 | 4,49 | 25,2 |
| 830 | Weibull | 10 | 1,79 | 21,3 |
| 795 | Weibull | 43 | 2,02 | 21 |
| 960 | Triangular | 18 | 62,6 | 47,3 |

5.2.3.3 Tiempo de acuatamiento equipos de transporte

Se obtuvo el tiempo de acuatamiento para cada flota de transporte de acuerdo a datos históricos de la faena. Se considera el mismo tiempo de acuatamiento en frentes de carga y descarga debido a que no hay distinción entre ambos en los datos recopilados. La Tabla 5-7 muestra las distribuciones obtenidas para cada flota.

Tabla 5-7: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de acuatamiento equipos de transporte.

| Flota equipo de transporte | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| KOM 930E | Log Logistic | 1 | 3,62 | 0,21 |
| KOM 830E | Weibull | 1 | 2,83 | 0,30 |
| CAT 795 | Weibull | 0 | 7,9 | 1,11 |
| KOM 960E | Weibull | 0 | 8,06 | 1,2 |

5.2.3.4 Tiempo de descarga equipos de transporte

Se considera un tiempo de descarga para cada flota sin distinción del frente de descarga debido a que no existe esta clasificación en los datos históricos recopilados. La Tabla 5-8 muestra las distribuciones obtenidas para cada flota.

Tabla 5-8: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de descarga equipos de transporte.

| Tiempo descarga | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 | Parámetro 4 |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| KOM 930E | Beta | 0 | 2,43 | 3,49 | 1,72 |
| KOM 830E | Triangular | 0 | 3,11 | 2,49 | – |
| CAT 795 | Weibull | 0 | 3,99 | 1,78 | – |
| KOM 960E | Weibull | 0 | 4,13 | 1,65 | – |

5.2.3.5 *Tiempos de carga equipos de transporte por equipo de carguío*

Debido a que los equipos de carguío tienen distintas capacidades, el tiempo de carga de los equipos de transporte varía de acuerdo al tipo de pala utilizado. Las tablas a continuación muestran las distribuciones obtenidas para cada flota de transporte de acuerdo a la flota de carguío utilizada.

Tabla 5-9: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 930E.

| Tiempo de carga KOM 930E | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Pala PAB | Weibull | 1 | 6,4 | 1,37 |
| Pala PHK | Gamma | 4 | 11,8 | 0,113 |
| CFL | Weibull | 6 | 1,62 | 1,17 |

Tabla 5-10: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 830E.

| Tiempo de carga KOM 830E | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PAB | Weibull | 0 | 4,1 | 1,8 |
| PHK | Log Logistic | 2 | 5,43 | 2,23 |
| CFL | Weibull | 2 | 5,19 | 3,16 |

Tabla 5-11: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte CAT 795.

| Tiempo de carga CAT 795 | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PAB | Log Logistic | 1 | 9,55 | 1,52 |
| PHK | Log Logistic | 3 | 2,67 | 1,17 |

Tabla 5-12: Distribuciones de probabilidad. Tiempo de carga flota de transporte KOM 960E.

| Tiempo de carga KOM 960E | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PAB | Log Logistic | 1 | 7,25 | 1,31 |
| PHK | Weibull | 3 | 1,56 | 1,75 |

De las distribuciones anteriores se observa que los cargadores frontales solo pueden cargar a las flotas de transporte KOM 930E y KOM 830E debido al plan minero quinquenal.

5.2.3.6 *Habilitación equipos de carga*

Tabla 5-13: Distribuciones de probabilidad. *Habilitación equipos de carguío.*

| Equipo de carguío | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 | Parámetro 4 |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PAB05 | Triangular | 6 | 78 | 75,8 | – |
| PAB06 | Triangular | 3 | 81,4 | 55,2 | – |
| PAB07 | Beta | 6 | 58,9 | 1,17 | 1,13 |
| PAB08 | Triangular | 37 | 78,4 | 74,7 | – |
| PAB10 | Triangular | 37 | 85,6 | 69,4 | – |
| PAB11 | Triangular | 36 | 82,1 | 80,8 | – |
| PAB12 | Weibull | 38 | 2,97 | 31,2 | – |
| PHK09 | Weibull | 9 | 2,2 | 40,2 | – |
| PHK13 | Triangular | 31 | 80 | 78,1 | – |
| PHK14 | Uniforme | 36 | 80,2 | – | – |
| CFL07 | Triangular | 18 | 62,6 | 47,3 | – |
| CFL08 | Beta | 30 | 62,1 | 1,34 | 1,14 |

La habilitación de los equipos de carga se calcula de la misma forma que para equipos de transporte. Las distribuciones se obtienen para cada equipo de carguío según los datos históricos de cada uno. La Tabla 5-13 muestra las distribuciones obtenidas.

5.2.3.7 *Rendimiento chancadores*

Debido a la gran cantidad de mineral movido en la mina, la faena cuenta con dos equipos de chancado primario. Ambos equipos son de las mismas características y los equipos de transporte pueden descargar el mineral en cualquiera de los dos chancadores. La cantidad de mineral enviado a planta se considera como la suma de mineral tratado por ambos equipos de chancado primario. El rendimiento de los chancadores se calcula como la cantidad de tonelaje que tratan por hora efectiva de uso. La Tabla 5-14 muestra las distribuciones obtenidas para estos equipos.

Tabla 5-14: Distribuciones de probabilidad. Rendimiento efectivo de chancadores.

| Equipo | Distribución | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 |
|--------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| CH1 | Triangular | 2220 | 3930 | 3870 |
| CH2 | Triangular | 3290 | 4900 | 4840 |

5.2.4 Resultados operacionales enero 2016

El plan de producción quinquenal considera una descripción de los frentes de carga y frentes de descarga para cada mes evaluado. La Figura 5.11 muestra la distribución espacial para frentes de carga y descarga ingresados al simulador DSim Open Pit.

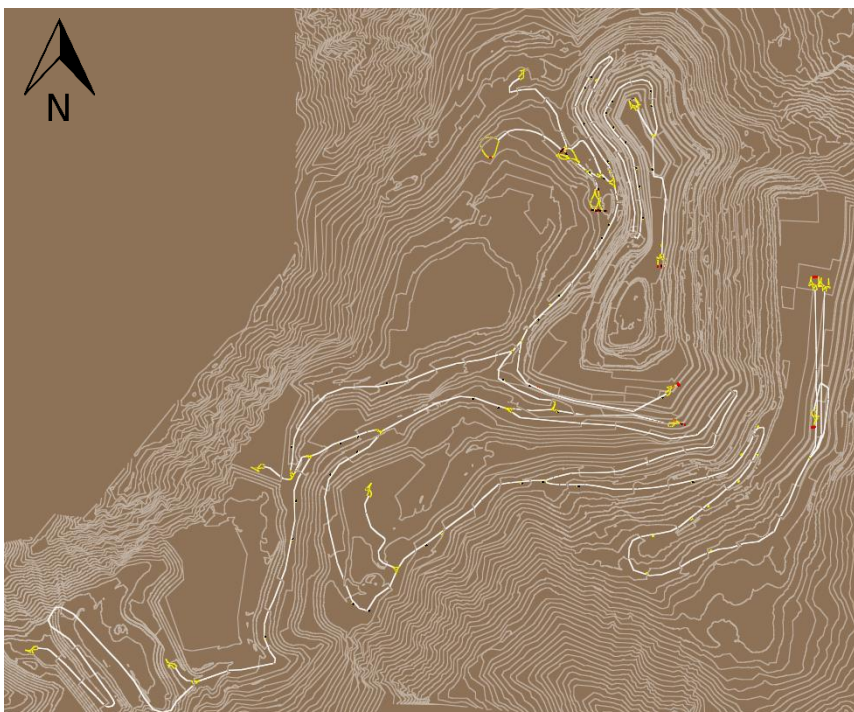


Figura 5.11: Red de transporte y topografía enero 2016.

El plan quinquenal analizado contiene el plan de producción detallado por intervalos de cuatro días aproximadamente. Debido a que el simulador DSim Open Pit tiene una escala de tiempo de segundos, para la descripción de plan dentro del simulador, se realiza una simulación cada cuatro días del plan quinquenal utilizado. Para obtener el tonelaje total del mes, se suman los resultados generados en cada simulación. Finalmente, se realizan 100 réplicas del movimiento de material para obtener una distribución de probabilidad del escenario simulado.

Tabla 5-15: Equipos utilizados enero 2016 modelo DSim Open Pit.

| Tipo de equipo | Flota | Número de equipos |
|-----------------------|--------------|--------------------------|
| Carga | 495BII (PAB) | 4 |
| | PC5500 (PHK) | 1 |
| | 495HR (PAB) | 1 |
| Transporte | KOM 830E | 8 |
| | KOM 930E | 51 |
| | CAT 795 | 11 |
| | KOM 960E | 2 |

Los equipos de carguío se cambian de frente de acuerdo al tipo de material que cargan por turno. Debido a que se la simulación es para un mes, en el plan quinquenal no hay cambios significativos de equipos de carguío, cada pala se mantiene en la misma fase durante todo el mes, cambiando de frente dependiendo del tipo de material a cargar. Los equipos utilizados se describen en la Tabla 5-15 a continuación.

Para el mes de enero del 2016 se encuentran tres fases activas y seis frentes de descarga de material. Los frentes de descarga son:

- Chancado
- Stock de mineral 1
- Stock de mineral 2
- Lix
- Estéril 1
- Estéril 2

Hay tres tipos de material: mineral, estéril y lix. El mineral puede ir a los stock de mineral o a chancado dependiendo del plan, el estéril puede ir a los frentes de descarga de estéril dependiendo de la composición mineralógica del material y el lix es enviado a una pila de lixiviación.

Con las 100 réplicas realizadas para el mes de enero 2016, se genera un histograma de distribución para el total de material movido desde banco y el mineral enviado a chancado. Las figuras a continuación muestran los resultados obtenidos.

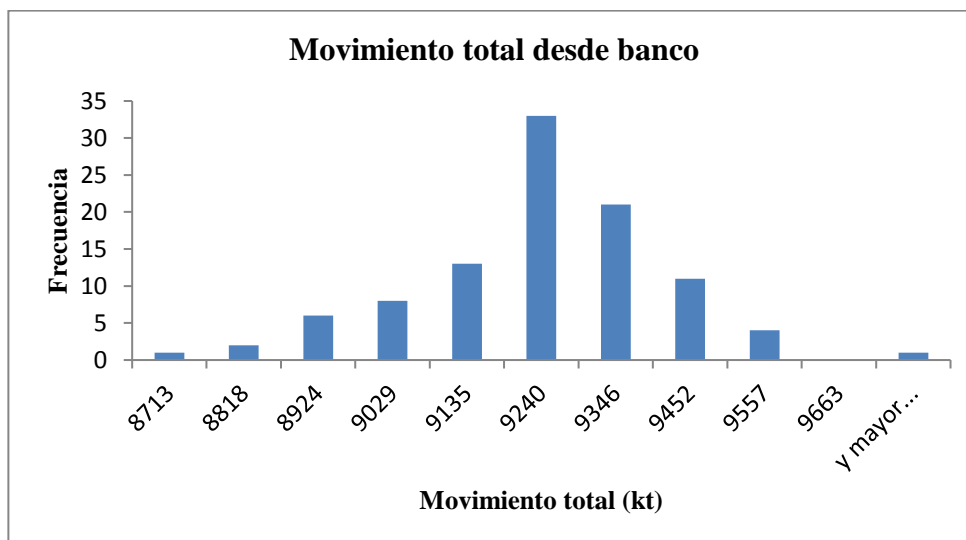


Figura 5.12: Histograma movimiento total desde banco. Enero 2016.

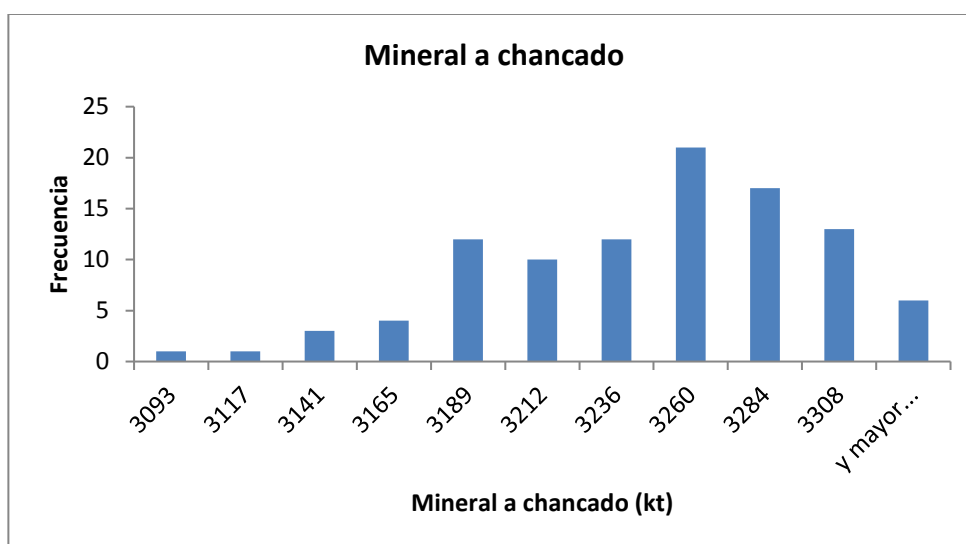


Figura 5.13: Histograma mineral a chancado. Enero 2016.

Para cada uno de los resultados anteriores se obtienen los estadísticos principales. La Tabla 5-16 muestra los valores obtenidos para el movimiento total desde banco y el mineral total enviado a chancado para el periodo enero 2016.

Tabla 5-16: Resultados productivos enero 2016 modelo DSIm Open Pit.

| Estadístico | Producción total desde banco | Mineral a chancado |
|---------------------|------------------------------|--------------------|
| Media (kt) | 9194.3 | 3237.4 |
| Desv. Estándar (kt) | 174.6 | 52.1 |

Continuación Tabla 5-16: Resultados productivos enero 2016 modelo DSim Open Pit.

| Estadístico | Producción total desde banco | Mineral a chancado |
|-------------|------------------------------|--------------------|
| Mínimo (kt) | 8712.8 | 3092.9 |
| Máximo (kt) | 9768.1 | 3332.0 |

5.2.5 Resultados operacionales enero 2017

Al igual que el caso anterior, el plan de producción quinquenal considera una descripción de los frentes de carga y frentes de descarga para el mes de enero de 2017. La Figura 5.14 muestra la distribución espacial para frentes de carga y descarga ingresados al simulador DSim Open Pit, además de la topografía presentada en el plan quinquenal.



Figura 5.14: Red de transporte y topografía enero 2017.

El plan quinquenal contiene la producción detallada por intervalos de cuatro días aproximadamente para los tres primeros años. Es por esto, que el plan para el mes de enero 2017 está descrito de igual manera que para enero 2016, realizando una simulación cada cuatro días del plan quinquenal utilizado. Para obtener el tonelaje total del mes, se suman los resultados generados en cada simulación. Finalmente, se realizan 100 réplicas del movimiento de material para obtener una distribución de probabilidad del escenario simulado.

Tabla 5-17: Equipos utilizados enero 2017 modelo DSim Open Pit.

| Tipo de equipo | Flota | Número de equipos |
|----------------|--------------|-------------------|
| Carga | 495BII (PAB) | 4 |
| | PC5500 (PHK) | 0 |
| | 495HR (PAB) | 2 |
| Transporte | KOM 830E | 8 |
| | KOM 930E | 51 |
| | CAT 795 | 11 |
| | KOM 960E | 2 |

Los equipos de carguío se cambian de frente de acuerdo al tipo de material que cargan por turno. Debido a que se la simulación es para un mes, en el plan quinquenal no hay cambios significativos de equipos de carguío, cada pala se mantiene en la misma fase durante todo el mes, cambiando de frente dependiendo del tipo de material a cargar. Los equipos utilizados se describen en la Tabla 5-17.

Para el mes de enero del 2017, se encuentran tres fases activas y ocho frentes de descarga de material. Los frentes de descarga son:

- Chancado
- Stock de mineral 1
- Stock de mineral 2
- Lix 1
- Lix 2
- Estéril 1
- Estéril 2
- Estéril 3

Hay tres tipos de material: mineral, estéril y lix. El mineral puede ir a los stock de mineral o a chancado dependiendo del plan, el estéril puede ir a los frentes de descarga de estéril dependiendo de la composición mineralógica del material y el lix es enviado a las pilas de lixiviación dependiendo del plan.

Con las 100 réplicas realizadas para el mes de enero 2017, se genera un histograma de distribución para el total de material movido desde banco y el mineral enviado a chancado. Las figuras a continuación muestran los resultados obtenidos.

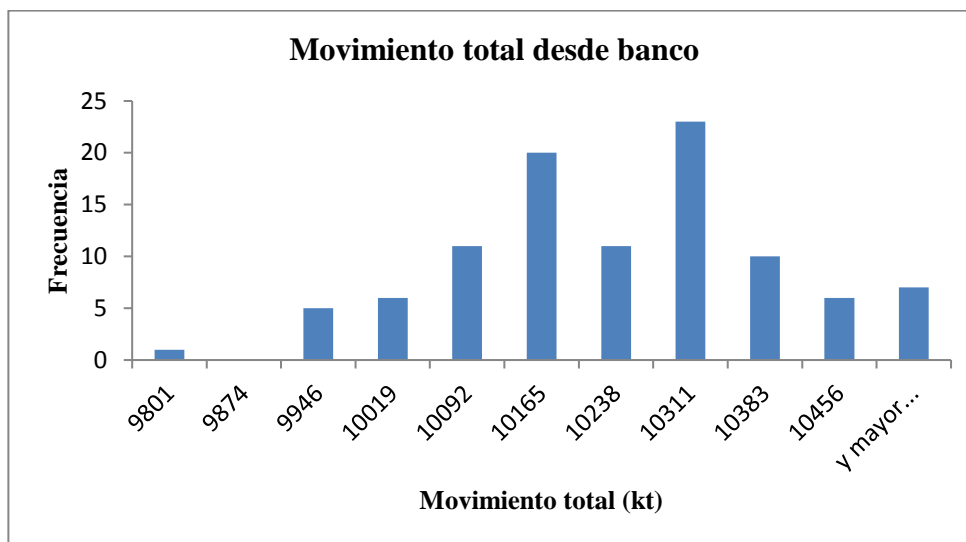


Figura 5.15: Histograma movimiento total desde banco. Enero 2017.

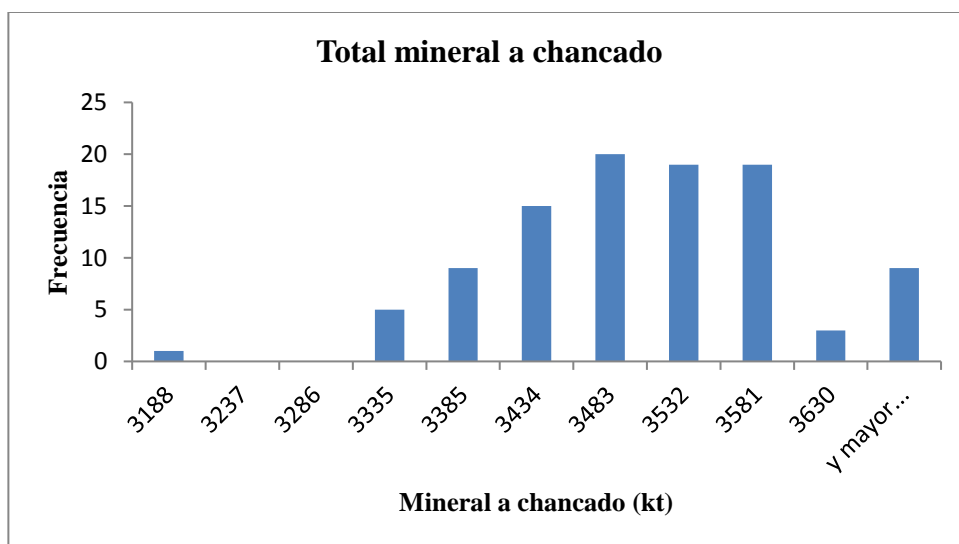


Figura 5.16: Histograma mineral a chancado. Enero 2017.

Para cada uno de los resultados anteriores se obtienen los estadísticos principales. La Tabla 5-18 muestra los valores obtenidos para el movimiento total desde banco y el mineral total enviado a chancado para el periodo enero 2017.

Tabla 5-18: Resultados productivos enero 2017 modelo DSIm Open Pit.

| Estadístico | Producción total desde banco | Mineral a chancado |
|---------------------|------------------------------|--------------------|
| Media (kt) | 10.205 | 3.481 |
| Desv. Estándar (kt) | 158 | 93 |

Continuación Tabla 5-18: Resultados productivos enero 2017 modelo DSim Open Pit.

| Estadístico | Producción total desde banco | Mineral a chancado |
|-------------|------------------------------|--------------------|
| Mínimo (kt) | 9.801 | 3.188 |
| Máximo (kt) | 10.529 | 3.679 |

La Tabla 5-19 muestra la producción total a banco y el mineral enviado a chancado para los meses de enero 2016 y enero 2017 del plan de producción brindado por la empresa minera. En la misma tabla se muestra la media de los mismos parámetros obtenidos por DSim Open Pit.

Tabla 5-19: Resultados DSim Open Pit versus plan de producción determinístico.

| | Enero 2016 | | Enero 2017 | |
|--|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) |
| Valores plan quinquenal | 12.326 | 3.538 | 13.191 | 3.790 |
| Media resultados DSim Open Pit | 9.194 | 3.237 | 10.205 | 3.481 |
| Diferencia entre plan y DSim Open Pit (%) | 25,4 | 8,5 | 22,6 | 8,1 |

De los resultados anteriores se puede observar, que tanto para la producción total desde banco como para el mineral enviado a chancado, la media obtenida con el simulador DSim Open Pit es menor a los valores presentados en el plan de producción quinquenal determinístico. Según las distribuciones de datos obtenidas con DSim Open Pit, en ambos meses, la producción total desde banco presentada por el plan de producción determinístico es superior al valor máximo simulado, es decir, no se alcanza la producción bajo ninguno de los escenarios generados. A su vez, el mineral a chancado presentado por el plan de producción, supera el valor máximo simulado con DSim Open Pit, pero con una diferencia menor al 7% en ambos meses.

Estos resultados indican que el plan de producción total de material desde banco es muy optimista con respecto a los resultados históricos de la faena según el modelo DSim Open Pit. Si bien el mineral a chancado planificado supera el valor máximo simulado con DSim Open Pit, debido a la alta prioridad que se le da al mineral enviado a chancado, la diferencia es menor que la obtenida para la producción total de material desde banco.

5.3 Comparación modelos de incertidumbre operacional

Luego de la obtención de resultados para cada modelo de incertidumbre (GEM|REEM y DSim Open Pit), se hace la comparación entre estos y el plan quinquenal estudiado. La Tabla 5-20 muestra la comparación entre los resultados obtenidos por modelo (valor medio) y lo planificado para el mes de enero 2016.

Tabla 5-20: Tabla comparativa de resultados para los modelos de incertidumbre operacional. Enero 2016.

| | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) |
|--|--|--------------------------------|
| Valores plan quinquenal | 12.326 | 3.538 |
| Resultados GEM REEM | 10.299 | 3.165 |
| Resultados DSim Open Pit | 9.194 | 3.237 |
| Diferencia entre plan y GEM REEM (%) | 16,4 | 10,6 |
| Diferencia entre plan y DSIM OPEN PIT (%) | 25,4 | 8,5 |
| Diferencia entre GEM REEM y DSim Open Pit | 10,7 | 2,3 |

A su vez, la Tabla 5-21 muestra la comparación de resultados para el mes de enero 2017.

Tabla 5-21: Tabla comparativa de resultados para los modelos de incertidumbre operacional. Enero 2017.

| | Producción total desde banco (kt) | Mineral a chancado (kt) |
|--|--|--------------------------------|
| Valores plan quinquenal | 13.191 | 3.790 |
| Resultados GEM REEM | 10.528 | 3.728 |
| Resultados DSim Open Pit | 10.205 | 3.482 |
| Diferencia entre plan y GEM REEM (%) | 20,2 | 1,6 |
| Diferencia entre plan y DSIM OPEN PIT (%) | 22,6 | 8,1 |
| Diferencia entre GEM REEM y DSim Open Pit | 3,1 | 6,6 |

Como se puede observar en las comparaciones anteriores, con ambos modelos de incertidumbre operacional, GEM|REEM y DSim Open Pit, no se llega a los valores presentados en el plan quinquenal, tanto como para la producción total desde banco, como para el mineral enviado a chancado. Estos resultados se presentan en los dos meses estudiados.

Para el mes de enero de 2016, la diferencia porcentual entre el plan quinquenal y el modelo GEM|REEM para la producción total desde banco es de 16,4% y para el mineral enviado a chancado es de 10,6%. La diferencia entre el plan quinquenal y el modelo DSim Open Pit para el

mismo mes es de 25,4% para la producción total desde banco y 8,5% para el mineral enviado a chancado.

Para el mes de enero de 2017, la diferencia porcentual entre el plan quinquenal y el modelo GEM|REEM para la producción total desde banco es de 20,2% y para el mineral enviado a chancado es de 1,6%. La diferencia entre el plan quinquenal y el modelo DSim Open Pit para el mismo mes es de 22,6% para la producción total desde banco y 8,1% para el mineral enviado a chancado.

Por otro lado, la comparación entre los resultados obtenidos de ambos modelos de incertidumbre, muestra que la diferencia entre estos es menor al 11% en todos los casos. En particular, para el mes de enero de 2016, la diferencia porcentual para la producción total desde banco es de 10,7%, mientras que la diferencia porcentual para el mineral enviado a chancado es de un 2,3%. De igual forma, para el mes de enero de 2017, la diferencia porcentual en la producción total desde banco es de 3,1% y la de mineral enviado a chancado es de 6,6%.

Con los resultados mostrados anteriormente, se observa que hay menor diferencia con el plan quinquenal determinístico en el mineral enviado a chancado que en los otros destinos. Esto es debido a la mayor prioridad que se le da al llenado de la planta. Esta medida, si bien es considerada en la mayoría de los planes mineros, debe ir siempre considerando el movimiento de estéril para mantener la relación lastre-mineral y además, mantener la mina en el largo plazo, ya que al priorizar sólo la obtención de mineral, atrasando el movimiento de lastre, genera menores cumplimientos de mineral en el futuro, comprometiendo la viabilidad tanto técnica como económica de la mina, debido al desfase que se genera entre las fases de mineral y de estéril (esta generalmente en cotas superiores del rajo).

5.4 Análisis de resultados para la operación

De los resultados anteriores, se puede observar que para los meses estudiados, el plan de producción quinquenal planificado tiene baja probabilidad de ocurrencia con los dos modelos analizados, pese a la diferencia entre las metodologías.

De los análisis y la descripción de cada uno de los modelos realizados anteriormente, se puede decir que los dos modelos son una buena aproximación de la realidad operacional de la mina, pero cada uno puede ser utilizado en distintos horizontes de planificación.

El simulador DSim Open Pit, debido a que describe segundo a segundo la operación minera, describe de buena manera la planificación minera de corto plazo, en donde el plan minero de producción debe estar detallado turno a turno, generando tiempos de espera, velocidad de los equipos de transporte y producción de cada equipo de carga. Permite montar un ejercicio y analizar distintos escenarios, pudiendo rápidamente recuperar resultados relevantes como la productividad de equipos clave, producción por ciclo, entre otros.

Debido al gran nivel de detalle del simulador DSim Open Pit, la generación de simulaciones para horizontes temporales más largos (como meses o años), exigen un mayor análisis para el ingreso del plan minero determinístico, demandando mayor tiempo en la realización de cada una de las simulaciones.

Por otro lado, el modelo GEM|REEM, debido a que ingresa el plan a escala mensual y sus parámetros son descritos a esta escala temporal, las conclusiones que se pueden obtener de él son para horizontes de planificación de mediano y largo plazo, generando alternativas de gestión de riesgo del plan de producción completo y no día a día o por turno.

Como los resultados del modelo GEM|REEM son a escala mensual/trimestral (para el plan minero analizado), los parámetros operacionales como productividad y tiempos de ciclo de los equipos, no pueden ser obtenidos a partir de estos resultados, debiendo usarse otras herramientas para realizar estos análisis.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el plan quinquenal completo y un análisis de sensibilidad que muestra las variables más influyentes en el cumplimiento del plan para el modelo GEM|REEM.

La Figura 5.17 a continuación muestra el gráfico de tornado de las incertidumbres consideradas en el análisis, ordenadas respecto al impacto de riesgo de producción de cobre a nivel quinquenal.

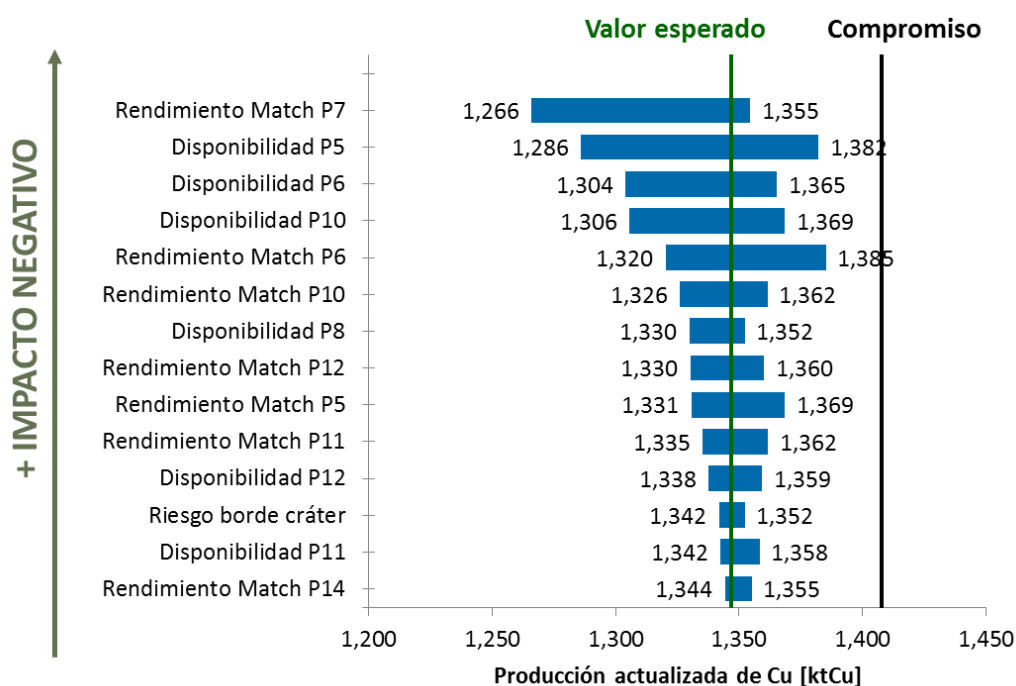


Figura 5.17: Gráfico de tornado del impacto de riesgos de producción de cobre quinquenal.

Fuente: GEM, 2015.

De acuerdo a la Figura 5.17, las incertidumbres que mayor impacto tienen en la producción de cobre son el rendimiento de las palas, seguido del *match* pala-camión.

Se estima un atraso de 18% para 2016 y 15% para el quinquenio en la extracción de material. Los principales riesgos que impactan en la extracción son el rendimiento de la flota Komatsu 930 y de la flota CAT 793, seguido por la disponibilidad de las mismas flotas (GEM, 2015).

Se espera que para el 2016 y 2017 la producción comprometida se cumpla con una probabilidad de 63% y 58% respectivamente, sin embargo, entre el 2018 y 2020 el cumplimiento se vuelve infactible (GEM, 2015).

Si se terminan o eliminan los riesgos de disponibilidad palas, rendimiento *match* palas, disponibilidad flotas de transporte y rendimiento flotas de transporte, el modelo GEM|REEM concluye que se cumple a cabalidad con la extracción y movimiento de material en la mina, asegurando una alimentación de mineral igual al compromiso determinístico del plan quinquenal.

La Figura 5.18 muestra la distribución de probabilidad obtenida para el caso sin riesgo en sistema carguío-transporte.

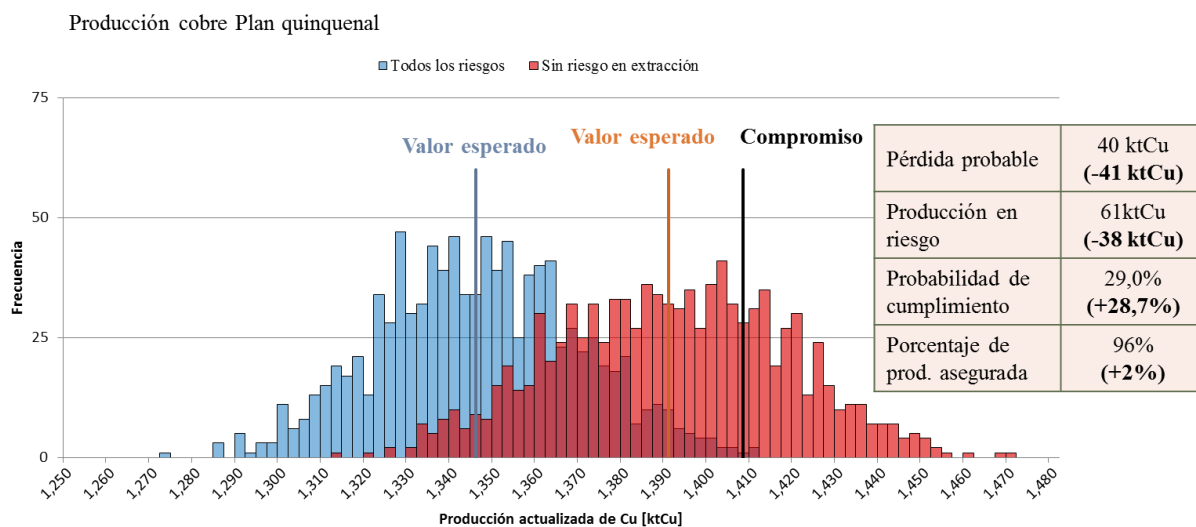


Figura 5.18: Distribución producción de cobre plan quinquenal terminando con riesgo en sistema carguío-transporte.

De los resultados anteriores se puede observar que la incertidumbre operacional en la mina estudiada tiene un gran impacto en el cumplimiento del plan de producción realizado determinísticamente.

Los estudios realizados, tanto lo realizado por la empresa de ingeniería GEM como los realizados por la autora de esta memoria con el simulador DSim, son alternativas viables para la evaluación de planes mineros. A pesar de las diferencias metodológicas de ambos modelos, se obtienen conclusiones similares con respecto al cumplimiento del plan minero estudiado.

De los resultados obtenidos para el plan quinquenal completo, se observa que hay muy baja probabilidad de cumplimiento para el plan con las incertidumbres analizadas. Este resultado tiene un gran valor para la mina que hizo el estudio ya que le permite perfeccionar la metodología de generación de planes de mediano plazo, como su consecuencia en el LOM y en la planificación de corto plazo.

Al incluir incertidumbre en la generación de planes mineros, se pueden identificar aquellas áreas, procesos y equipos que más impactan en la operación minera. Ambos modelos revelan que la interacción entre los equipos de carguío y transporte es fundamental para el cumplimiento del plan.

Los resultados de las simulaciones se pueden obtener en forma rápida y ambos *software* fueron generados para que su uso sea fácil para el usuario. Es por esto que la utilización de este tipo de métodos es muy útil en la generación de planes mineros y sus cambios en el tiempo. Todos los parámetros pueden ser ajustados, por lo que sirven para el futuro de la mina. Si bien cada modelo tiene distintos horizontes de planificación, estos pueden ser utilizados en forma complementaria y así robustecer los resultados obtenidos por ambos por separado.

6 Conclusiones

Para la realización de planes mineros, se consideran características de la mina y de los equipos a utilizar, sin embargo, debido a que la operación minera se realiza bajo múltiples fuentes de incertidumbre, lograr cumplir el plan minero de mediano plazo es poco probable si sólo se consideran variables determinísticas. Es por esto, que el trabajo anterior busca validar la utilización de modelos permitan incluir incertidumbre en su análisis y, a través de dos modelos, generar múltiples escenarios para el plan minero determinístico realizado por la minera que facilitó la información y así lograr mejorar las estimaciones que se realizan en la generación de los planes mineros de producción.

Las variables más importantes consideradas en este trabajo fueron aquellas relacionadas con incertidumbres operacionales debido a que tienen un gran impacto en la producción y en las cuales se pueden generar acciones para disminuir estas fuentes de incertidumbre y así generar planes de producción con una mayor probabilidad de ocurrencia. Las incertidumbres más influyentes son las relacionadas con la disponibilidad de los equipos de carguío y transporte y su interacción en el sistema.

Según los resultados de la validación de los modelos con respecto a los valores reales de producción obtenidos por la faena, se observó que el promedio obtenido de las 100 simulaciones realizadas con el modelo DSim Open Pit tuvo una desviación menor al 5% con respecto al movimiento real. Este resultado valida los parámetros utilizados en el simulador DSim Open Pit para la realización de la simulación del plan de producción quinquenal de la faena estudiada.

Para el mes de enero de 2016, la diferencia porcentual entre el plan quinquenal y el modelo GEM|REEM para la producción total desde banco es de 16,4% y para el mineral enviado a chancado es de 10,6%. La diferencia entre el plan quinquenal y el modelo DSim Open Pit para el mismo mes, es de 25,4% para la producción total desde banco y 8,5% para el mineral enviado a chancado.

Para el mes de enero de 2017, la diferencia porcentual entre el plan quinquenal y el modelo GEM|REEM para la producción total desde banco es de 20,2% y para el mineral enviado a chancado es de 1,6%. La diferencia entre el plan quinquenal y el modelo DSim Open Pit para el mismo mes, es de 22,6% para la producción total desde banco y 8,1% para el mineral enviado a chancado.

De los resultados anteriores, se puede observar que según la distribución de datos obtenida con el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM, la producción total desde banco planteada por el plan determinístico supera el máximo valor simulado con el modelo, es decir, no se alcanza el plan bajo ningún escenario considerando incertidumbre operacional. Sin embargo, el mineral a chancado presentado por el plan de producción determinístico está dentro de la distribución de probabilidad obtenida con GEM|REEM. De esto, se puede decir que el plan de producción de material desde banco es muy optimista con respecto a los resultados históricos de la faena, sin embargo, debido a la alta prioridad que se le da al mineral enviado a chancado, el plan de producción para mineral tiene una alta probabilidad de cumplirse según la información generada con el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM.

A su vez, según las distribuciones de datos obtenidas con el simulador DSim Open Pit, en ambos meses, la producción total desde banco presentada por el plan de producción determinístico es superior al valor máximo simulado, es decir, no se alcanza la producción bajo ninguno de los escenarios generados. A su vez, el mineral a chancado presentado por el plan de producción, supera el valor máximo simulado con DSim Open Pit, pero con una diferencia menor al 7% en ambos meses. Estos resultados indican que el plan de producción total de material desde banco es muy optimista con respecto a los resultados históricos de la faena según el modelo DSim Open Pit. Si bien el mineral a chancado planificado supera el valor máximo simulado con DSim Open Pit, debido a la alta prioridad que se le da al mineral enviado a chancado, la diferencia es menor que la obtenida para la producción total de material desde banco.

De los resultados antes mostrados, se observa que el plan minero da prioridad al movimiento de mineral sobre otros destinos. Esta medida, si bien es considerada en la mayoría de los planes mineros, debe ir siempre considerando el movimiento de estéril para mantener la relación lastre-mineral y además, mantener la mina en el largo plazo, ya que al priorizar sólo la obtención de mineral, atrasando el movimiento de lastre, genera menores cumplimientos de mineral en el futuro, comprometiendo la viabilidad tanto técnica como económica de la mina, debido al desfase que se genera entre las fases de mineral y de estéril (esta generalmente en cotas superiores del rajo).

Por otro lado, la comparación entre los resultados obtenidos de ambos modelos de incertidumbre, muestra que la diferencia entre las medias es menor al 11% en todos los casos. En particular, para el mes de enero de 2016, la diferencia porcentual para la producción total desde banco es de 10.7%, mientras que la diferencia porcentual para el mineral enviado a chancado es de un 2,3%. De igual forma, para el mes de enero de 2017, la diferencia porcentual en la producción total desde banco es de 3,1% y la de mineral enviado a chancado es de 6,6%.

Al hacer la comparación entre las distribuciones de datos obtenidas por ambos modelos de incertidumbre, se puede observar que la distribución generada con DSim Open Pit está dentro de la distribución obtenida con GEM|REEM, es decir, ambos modelos están dentro de un mismo rango de posibles escenarios para ambos meses y para producción total desde banco y mineral a chancado. La diferencia está en que el rango de la distribución de datos generada con DSim Open Pit es mucho más acotado que el obtenido con GEM|REEM, pero tienen una forma similar.

Con los resultados anteriores, se puede decir que el modelo de gestión de riesgos GEM|REEM es una buena herramienta de generación de escenarios considerando incertidumbre operacional, según su comparación con el modelo de incertidumbre operacional DSim Open Pit, debido a la validación de ambos modelos con resultados operacionales de la faena y que los escenarios generados con estos modelos se encuentran en un mismo rango y con misma forma, con diferencia en el ancho de la distribución.

Del trabajo realizado, se puede concluir que los modelos que incluyen simulaciones, representan de mejor manera la realidad que los modelos determinísticos. Al incluir incertidumbre en las simulaciones, se generan escenarios que incluyen las características históricas de la mina y el comportamiento de los equipos mineros críticos y con esto, se pueden generar planes de producción acordes a cada faena y así lograr cumplir con las metas propuestas.

7 Recomendaciones

A continuación se describen algunos trabajos futuros que se pueden realizar para complementar los resultados obtenidos en esta memoria de título.

Debido a que los resultados de este trabajo muestran una priorización del movimiento de mineral por sobre el movimiento hacia otros destinos, el lastre global puede verse retrasado, es por esto, que se recomienda realizar simulaciones a más largo plazo para ver si este fenómeno se sostiene y si esto tiene implicancias en los costos de la mina o si por otro lado, las siguientes fases compensan los movimientos de lastre o distancias de acarreo más cortas.

Para generar los resultados antes expuestos, se utilizó el plan de producción quinquenal de una faena minera de cobre ubicada en territorio chileno. Para complementar los resultados obtenidos, se pueden utilizar ambos modelos de incertidumbre para otro horizonte de planificación. Debido a que DSim Open Pit tiene una escala de tiempo en segundos, el análisis puede realizarse en el plan de producción de corto plazo y así evaluar de mejor manera la planificación hecha en este horizonte temporal.

Debido a que el trabajo realizado se centró en la incertidumbre operacional, trabajos posteriores pueden considerar el análisis de otras fuentes de incertidumbre, como por ejemplo, geológicas o de mercado, ya que ambas fuentes tienen un alto impacto en la generación de un plan de producción.

Adicionalmente, como el simulador DSim Open Pit tiene un alto potencial, estudios posteriores pueden considerar la utilización de este modelo para encontrar la flota óptima de equipos de acuerdo a la incertidumbre operacional de la faena y el plan de producción considerado. Se pueden obtener a su vez tiempos de ciclo de los equipos de transporte y con esto, hacer un análisis de las rutas utilizadas para el transporte de mineral en la faena estudiada.

Ambos modelos, GEM|REEM y DSim Open Pit, tienen como *input* el plan de producción generado de manera determinística, pero ninguno de ellos busca optimizar el plan. Una línea adicional de análisis puede ser incluir un optimizador en las simulaciones y con esto, encontrar un plan óptimo de acuerdo a las características de la faena y los equipos utilizados.

Con los resultados obtenidos en esta memoria, se recomienda el uso de simulaciones para la generación de planes mineros de producción. Tener múltiples escenarios para el movimiento mina y de material que se envía a los distintos destinos, genera un conocimiento adicional para la mejor formulación de los planes de producción y con esto lograr aumentar la probabilidad de ocurrencia de las metas planteadas en ellos, mejorando la planificación en sus distintos horizontes temporales.

Debido a que cada modelo sirve para el análisis de distintos horizontes temporales, su uso como complemento, es una buena alternativa para la minera estudiada ya que los resultados entregados por GEM indican que las incertidumbres más relevantes para el cumplimiento del plan son aquellas relacionadas con el movimiento de materiales (palas, camiones). Así, al realizar el análisis de riesgo de GEM, para analizar distintas alternativas de mitigación de estos riesgos, se puede utilizar el simulador DSim Open Pit, en donde se pueden obtener en forma rápida parámetros operacionales clave para mitigar los riesgos generados por las incertidumbres operacionales.

8 Bibliografía

Cochilco. “Informe Tendencias del Mercado del Cobre”. Primer Trimestre de 2015.

Damghani K., Taghavifard M. y Tavakkoli Moghaddam R. (2009). “Decision Making Under Uncertain and Risky Situations”. Enterprise Risk Management Symposium Monograph Society of Actuaries-Schaumburg, Illinois.

Dimitrakopoulos R. C. T. Farrelly y M. Godoy (2002). “Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design”. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. tech -nol.), 111, p. 82-88.

Dimitrakopoulos R. Abdel S. (2007). “Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?”. Resources Policy, Vol. 32, No. 3, p. 116-125.

Dimitrakopoulos R. (2011). “Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments”. Journal of Mining Science, Vol. 47, No. 2, p. 138-150.

GEM (2013). “Planificación minera en tiempos inciertos”. Perspectiva GEM julio 2013.

GEM (2014). “Evaluación y gestión estratégica de activos. Una metodología para asegurar el cumplimiento del plan de producción de corto plazo”. Perspectiva GEM octubre 2014.

GEM (2015). “Gestión de riesgos para plan quinquenal. Documento final”. Santiago, Chile.

GEM (2015). “Manual de usuario GEM|REEM. IT18-15-07”. Santiago, Chile.

Horsley T. P. (2002). “Dollar driven mine planning: The corporate perspective to operational mine planning”. AMC reference material.

Laboratorio de Planificación minera Delphos (2015). “Manual de usuario DSim Open Pit Open Pit”. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Lantuéjoul, C. (2002). Geostatistical Simulation, Models and Algorithms. Springer, Berlin.

Law, A. y Kelton, W. (1991). “Simulation modeling and analysis”. McGraw-Hill, Inc. Second Edition.

López J. (2008). “Guía básica para la simulación de Monte Carlo”. Editorial AENOR.

Manríquez, F. (2015). “Evaluación de la incertidumbre geológica y operacional en planes mineros de corto plazo en faenas a cielo abierto”. Tesis de Magíster en Minería. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Mayer Z, Kazakidis V. (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.

Meagher, C., Abdel Sabour, S.A. y Dimitrakopoulos, R. (2010). “Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties”. *Orebody Modelling & Strategic Mine Planning*, AusIMM Spectrum Series, vol. 17, p. 297-304.

Mun J. (2006). “Modelling risk, applying monte carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques”. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Newman A. et al. (2010). “A review of operations research in mine planning”. *Interfaces* 40(3), p. 222-245.

Norma ISO 31000:2009 Risk Management – Principles and Guidelines.

Rudloff, B. (2013). “Metodología de valorización con opciones reales de secuenciamiento minero bajo incertidumbre”. Tesis de Magister en Minería. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Samis, M. y Davis, G. (2014). “Using Monte Carlo simulation with DCF and real options risk pricing techniques to analyse a mine financing proposal”, *Int. J. Financial Engineering and Risk Management*, Vol. 1, No. 3, p. 264–281.

Sepúlveda, G., Branch, J. y Jaramillo P. (2012). “Planeamiento de minas a cielo abierto mediante optimización estocástica”. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. No. 31, Medellín, ISSN 0120 – 3630, p. 107-113.

Topal E. (2008). “Evaluation of a mining project using Discounted Cash Flow analysis, Decision Tree analysis, Monte Carlo Simulation and Real Options using an example”. *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, Vol. 1, No. 1.

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.

Whittle D. (2011). “Open-Pit Planning and Design”. *SME Mining Engineering Handbook*, p. 877 – 901.

Yarmuch, J. y Ortiz, J. (2011). “A Novel Approach to Estimate the Gap Between the Middle and Short-Term Plans”. 35th APCOM Symposium / Wollongong, NSW, 24 – 30.

9 Anexos

En este capítulo se adjuntan los datos e información complementaria que describe parte del trabajo realizado durante la memoria de título.

9.1 Anexo A: Incertidumbres identificadas

El siguiente anexo tiene relación con los datos analizados y generados para la herramienta de gestión de riesgos GEM|REEM.

La Tabla 9-1 muestra las incertidumbres identificadas por GEM para el plan de producción quinquenal.

Tabla 9-1: Incertidumbres identificadas.

| # | Incertidumbre | Índice de ocurrencia | Índice de consecuencia | Índice de incertidumbre |
|----|--|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | Precio del cobre e insumos | 4 | 4 | 16 |
| 2 | Cambio en la regulación de glaciares | 4 | 3 | 12 |
| 3 | Disponibilidad de agua | 3 | 4 | 12 |
| 4 | Cierre de botadero Fase 1 Norte | 3 | 3 | 9 |
| 5 | Conflictividad laboral | 4 | 2 | 8 |
| 6 | Modificación límite cráter | 4 | 2 | 8 |
| 7 | Variables geometalúrgicas de Fase 4 | 3 | 2 | 6 |
| 8 | Restricciones de caja | 3 | 2 | 6 |
| 9 | Huelga en negociación colectiva 2016 | 3 | 2 | 6 |
| 10 | Falta de experiencia en operaciones invierno | 3 | 2 | 6 |
| 11 | Disponibilidad de la correa <i>overland</i> | 2 | 3 | 6 |
| 12 | Grave accidente en la G21 | 2 | 3 | 6 |
| 13 | Riesgo en los accesos industriales y mina | 2 | 3 | 6 |
| 14 | Riesgo aluvión | 2 | 3 | 6 |
| 15 | Precio TC-RC | 4 | 1 | 4 |
| 16 | Tipo de cambio | 4 | 1 | 4 |
| 17 | Días de invierno y días de deshielo | 4 | 1 | 4 |
| 18 | Capacidad de transporte de concentrado a puerto | 4 | 1 | 4 |
| 19 | Problemas estructurales geotécnicos severos | 2 | 2 | 4 |
| 20 | Problema de continuidad de alimentación a planta Fase 4 | 2 | 2 | 4 |
| 21 | Situación del tranque | 2 | 2 | 4 |
| 22 | Utilización efectiva del sistema Chanchado-Correa | 2 | 2 | 4 |
| 23 | Capacidad de <i>stock pile</i> (distancia de transporte) | 2 | 2 | 4 |
| 24 | Calidad de modelo KPI mina | 2 | 2 | 4 |

| # | Incertidumbre | Índice de ocurrencia | Índice de consecuencia | Índice de incertidumbre |
|----|---|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 25 | Retraso en la obtención de permisos | 2 | 2 | 4 |
| 26 | Sanciones o multas SMA u otros | 2 | 2 | 4 |
| 27 | Interferencia entre avance del cráter y fases operativas | 2 | 2 | 4 |
| 28 | Problemas en nueva organización (velocidad en adaptabilidad y reacción) | 2 | 2 | 4 |
| 29 | Continuidad de procesamiento durante período de invierno | 2 | 2 | 4 |
| 30 | Cambio cultural en base a recomendaciones AOM | 2 | 2 | 4 |
| 31 | Mal manejo de incidentes ambientales | 2 | 2 | 4 |
| 32 | Problemas estructurales geotécnicos severos (mayores que Fase 2, paralización de la mina) | 1 | 4 | 4 |
| 33 | Disponibilidad de uso de botadero | 1 | 4 | 4 |
| 34 | Pérdida de rampa sector Fase 2 norte | 1 | 4 | 4 |
| 35 | Estabilidad de botadero 1 | 1 | 4 | 4 |
| 36 | Pérdida de control y monitoreo de infiltraciones en tranques y botaderos | 1 | 4 | 4 |
| 37 | Falla en la pared del muro principal del tranque de relave | 1 | 4 | 4 |
| 38 | Falla estructural en los chancadores primarios | 1 | 4 | 4 |
| 39 | Desastres naturales | 1 | 4 | 4 |
| 40 | Confiabilidad de sistema perisféricos planta | 3 | 1 | 3 |
| 41 | Conflicto ruta G21 | 3 | 1 | 3 |
| 42 | Atraso en el proyecto prisma (botadero 1) | 3 | 1 | 3 |
| 43 | Accidente de trayecto | 3 | 1 | 3 |
| 44 | Venta de fundición y manejo de concentrado | 3 | 1 | 3 |
| 45 | Fallas en infraestructuras asociadas a equipos principales | 1 | 3 | 3 |
| 46 | No ejecución del plan de parte de Operaciones | 1 | 3 | 3 |
| 47 | Incendio en planta de cátodos | 1 | 3 | 3 |
| 48 | Falla de los gases de la planta moly | 1 | 3 | 3 |
| 49 | Incumplimiento de compromisos de permisos | 2 | 1 | 2 |
| 50 | Logro de líneas de programa con agua | 2 | 1 | 2 |
| 51 | Rendimiento de equipos de carguío | 2 | 1 | 2 |
| 52 | Conflictividad social mayor | 2 | 1 | 2 |
| 53 | Pérdida de acceso a Fase 1 (complicaciones) | 2 | 1 | 2 |
| 54 | Recuperación de moly | 2 | 1 | 2 |
| 55 | Recuperación de cobre | 2 | 1 | 2 |
| 56 | Accesos en la Fase 5 e Fase 3A | 2 | 1 | 2 |

| # | Incertidumbre | Índice de ocurrencia | Índice de consecuencia | Índice de incertidumbre |
|----|---|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 57 | Atraso en el plan de mejoras en la productividad | 2 | 1 | 2 |
| 58 | Pérdida de recursos humanos valiosos | 2 | 1 | 2 |
| 59 | Suministro y fabricación de explosivos | 1 | 2 | 2 |
| 60 | Suministro eléctrico (sistema de alta y baja tensión) | 1 | 2 | 2 |
| 61 | Cambio en el código de aguas | 1 | 2 | 2 |
| 62 | Colisión en el rajo | 1 | 2 | 2 |
| 63 | Autorización para operar fuera de la RCA (implica cambios en el <i>Budget</i>) | 1 | 2 | 2 |
| 64 | Confiabilidad del suministro de insumos | 1 | 2 | 2 |
| 65 | No cumplimiento de iniciativas de reducción de costos | 1 | 2 | 2 |
| 66 | Falla <i>gearless</i> (POLO) | 1 | 2 | 2 |
| 67 | Afectación del rendimiento por términos de fases | 1 | 2 | 2 |
| 68 | No cumplir las metas de la AOM | 1 | 2 | 2 |
| 69 | Impacto en la planta de Los Bronces por el <i>blasting</i> Fase 2 | 1 | 2 | 2 |
| 70 | Inhabitabilidad de edificio placa por tronadura Fase 3A | 1 | 2 | 2 |
| 71 | Mala relación <i>stakeholders</i> claves | 1 | 2 | 2 |
| 72 | Distribución de leyes de pozos de tronadura | 1 | 1 | 1 |
| 73 | Disponibilidad del sistema de pulpa y agua | 1 | 1 | 1 |
| 74 | Menor ritmo extracción primeros bancos de Fase 3A (producto de interferencias) | 1 | 1 | 1 |
| 75 | Restricción de puerto | 1 | 1 | 1 |
| 76 | Retraso puesta en marcha de proyecto pre-chancado | 1 | 1 | 1 |
| 77 | Retraso puesta en marcha conexión Concentradora 1 y 2 | 1 | 1 | 1 |
| 78 | Venta de concentrado con alto arsénico | 1 | 1 | 1 |
| 79 | Interferencia entre fases | 1 | 1 | 1 |
| 80 | Modelo de recuperación botadero (línea hidro) | 1 | 1 | 1 |
| 81 | Pérdida de competitividad por falta de introducción de tecnología | 1 | 1 | 1 |
| 82 | Problemas en la relación con Andina | 1 | 1 | 1 |
| 83 | Impacto del LOM en el quinquenal | 1 | 1 | 1 |
| 84 | No cumplimiento de la línea de programa (impacto en los diseños) | 1 | 1 | 1 |
| 85 | Ubicación del nivel freático (Fase 2) | 1 | 1 | 1 |
| 86 | Inchancables | 1 | 1 | 1 |
| 87 | Capacidad de tratamiento de la planta de neutralización | 1 | 1 | 1 |

| # | Incertidumbre | Índice de ocurrencia | Índice de consecuencia | Índice de incertidumbre |
|----|---|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 88 | Retraso puesta en marcha reubicación refinoducto | 1 | 1 | 1 |

9.2 Anexo B: Plan de producción quinquenal 2016-2020

A continuación se describe el plan de producción quinquenal completo, señalando el mineral a chancado y el movimiento total mensual.

Tabla 9-2: Plan de producción quinquenal 2016-2020.

| Periodo | Mineral a chancado (kt) | Movimiento total (kt) |
|----------|-------------------------|-----------------------|
| q1_2018 | 11.620 | 33.442 |
| q1_2019 | 12.512 | 42.129 |
| q1_2020 | 11.966 | 41.403 |
| q2_2018 | 11.636 | 29.930 |
| q2_2019 | 12.243 | 35.408 |
| q2_2020 | 11.815 | 36.955 |
| q3_2018 | 11.141 | 28.446 |
| q3_2019 | 12.334 | 33.641 |
| q3_2020 | 12.199 | 35.254 |
| q4_2018 | 12.519 | 34.287 |
| q4_2019 | 11.122 | 39.002 |
| q4_2020 | 12.319 | 42.053 |
| 01-01-16 | 3.538 | 12.326 |
| 01-02-16 | 3.260 | 12.168 |
| 01-03-16 | 3.892 | 13.519 |
| 01-04-16 | 3.460 | 11.115 |
| 01-05-16 | 3.769 | 10.869 |
| 01-06-16 | 3.250 | 10.068 |
| 01-07-16 | 3.518 | 10.016 |
| 01-08-16 | 3.843 | 9.544 |
| 01-09-16 | 3.811 | 9.789 |
| 01-10-16 | 3.904 | 12.447 |
| 01-11-16 | 3.813 | 12.775 |
| 01-12-16 | 3.826 | 12.804 |
| 01-01-17 | 3.790 | 13.191 |
| 01-02-17 | 3.745 | 11.791 |
| 01-03-17 | 4.121 | 13.277 |
| 01-04-17 | 3.303 | 12.027 |
| 01-05-17 | 3.755 | 11.637 |

| Periodo | Mineral a chancado (kt) | Movimiento total (kt) |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 01-06-17 | 3.232 | 10.800 |
| 01-07-17 | 3.750 | 10.819 |
| 01-08-17 | 3.829 | 10.819 |
| 01-09-17 | 3.929 | 11.208 |
| 01-10-17 | 3.399 | 13.277 |
| 01-11-17 | 3.929 | 12.849 |
| 01-12-17 | 3.893 | 13.026 |
| Total general | 231.986 | 714.111 |

9.3 Anexo C: Distribuciones de probabilidad e histogramas experimentales

A continuación se presentan los histogramas experimentales obtenidos para las variables operacionales consideradas para el simulador DSim Open Pit. Los datos fueron analizados en el programa de análisis estadístico StartFit, de Promodel Corporation para generar las distribuciones de probabilidad.

9.3.1 Factor de carga

A continuación se presentan los histogramas y distribuciones de probabilidad de los equipos de transporte diferenciados por flota.

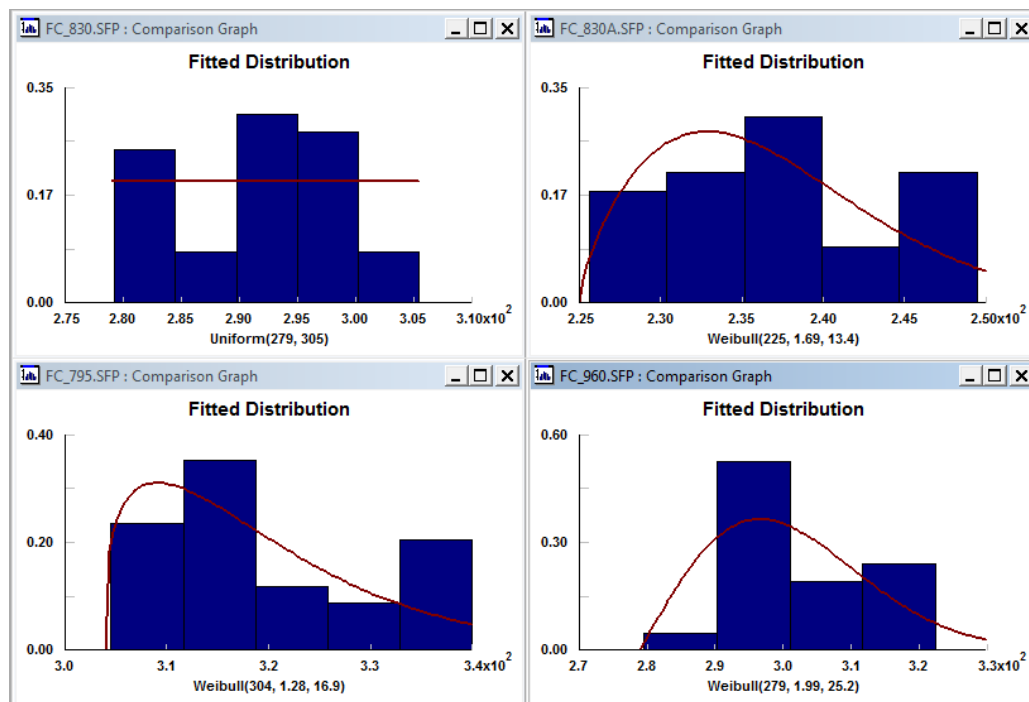


Figura 9.1: Histogramas factor de carga equipos de transporte.

9.3.2 Habilitación equipos de transporte

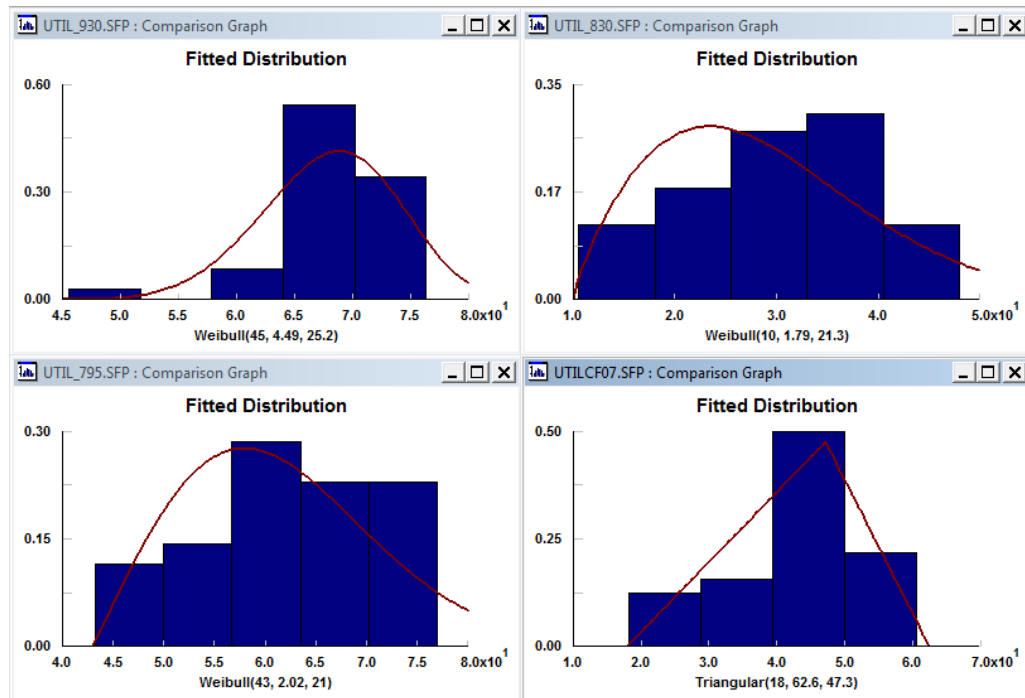


Figura 9.2: Histogramas de habilitación de equipos de transporte.

9.3.3 Tiempo de aculataamiento equipos de transporte

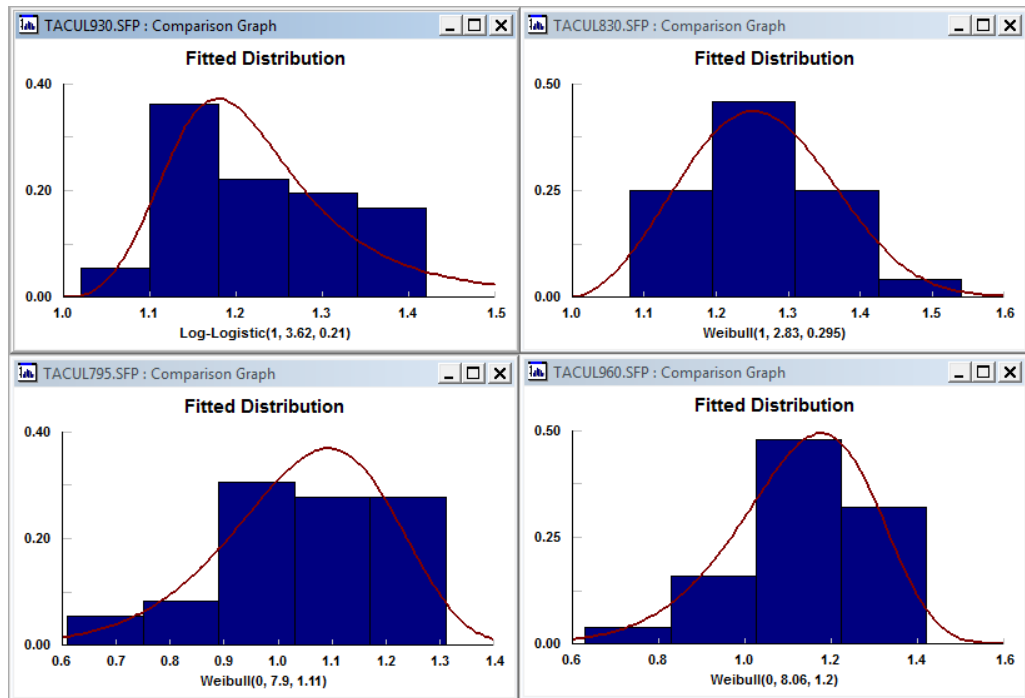


Figura 9.3: Histogramas tiempo de aculataamiento equipos de transporte.

9.3.4 Tiempo de descarga equipos de transporte

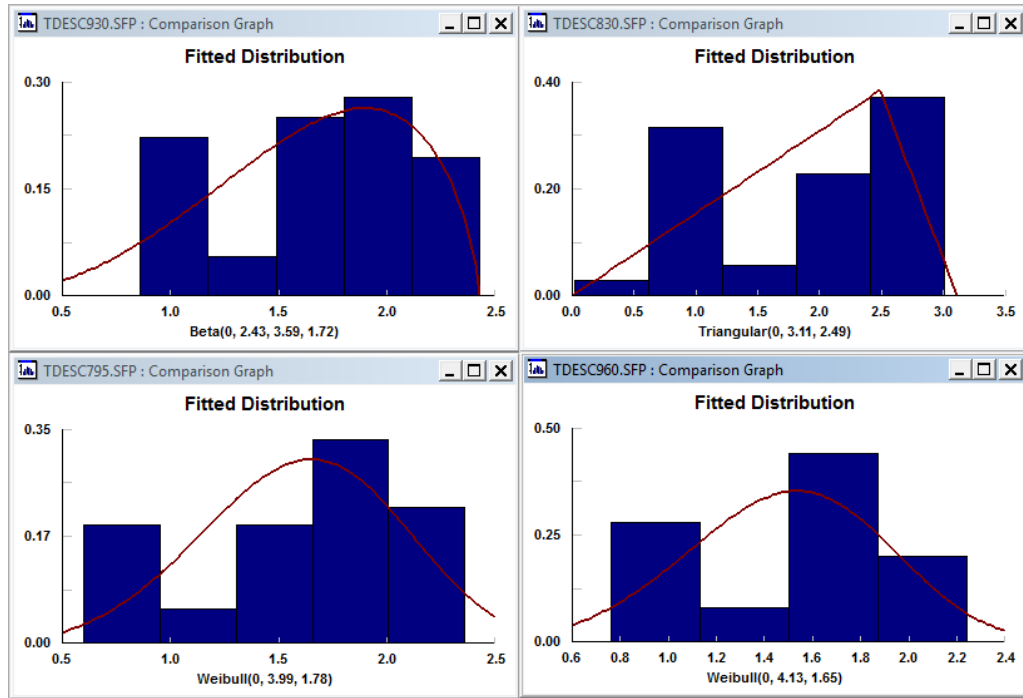


Figura 9.4: Histogramas tiempo de descarga equipos de transporte.

9.3.5 Tiempos de carga equipos de transporte por equipo de carguío

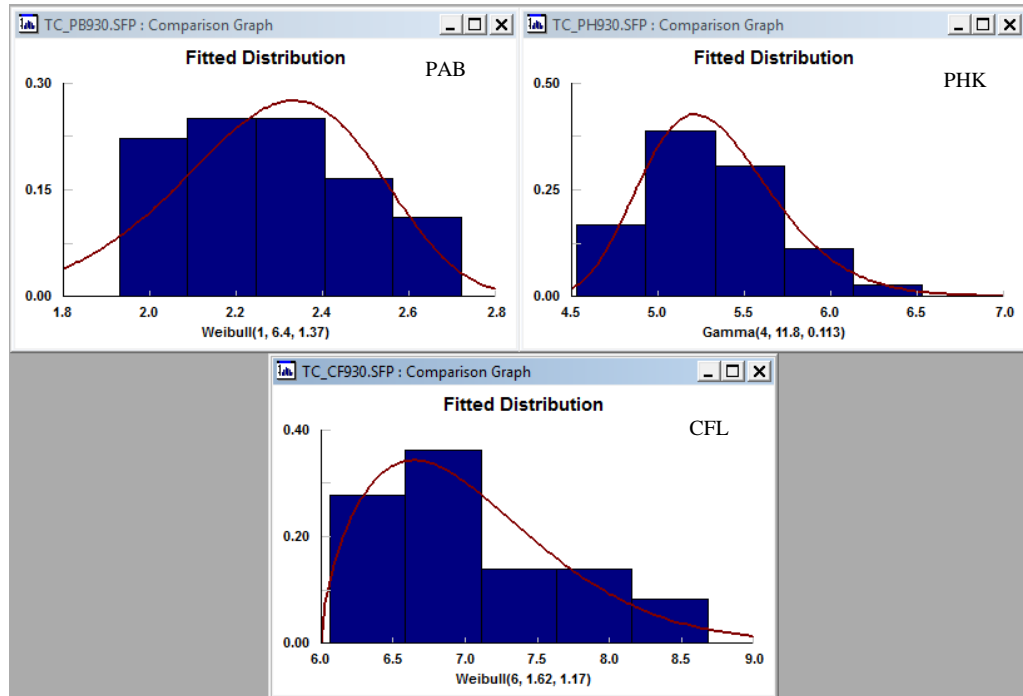


Figura 9.5: Histogramas tiempos de carga flota KOM 930E.

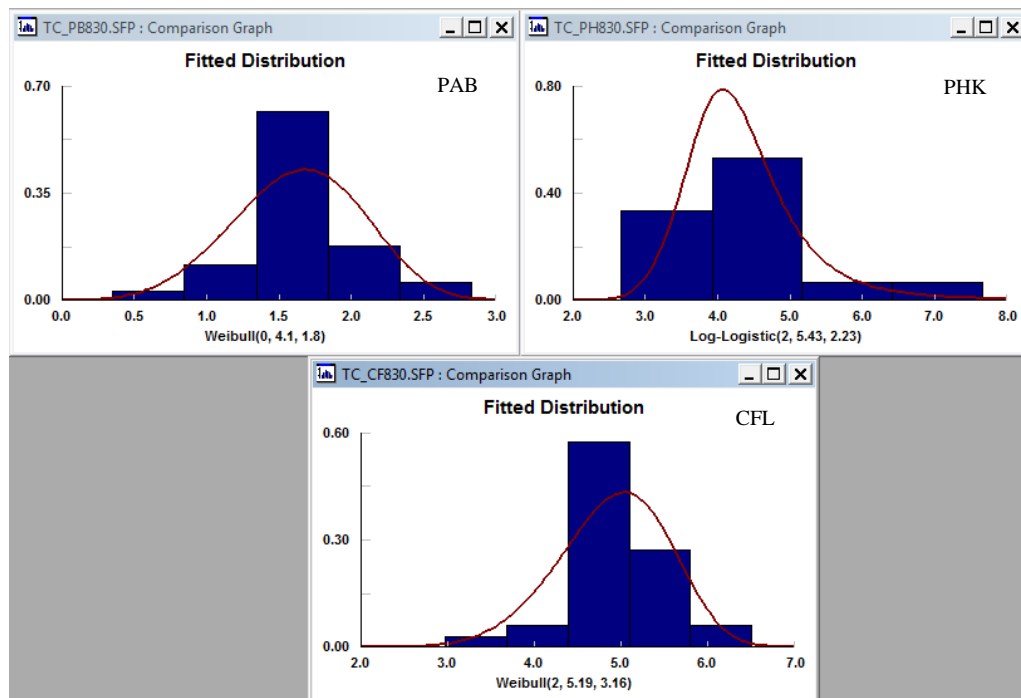


Figura 9.6: Histogramas tiempo de carga flota KOM 830E.

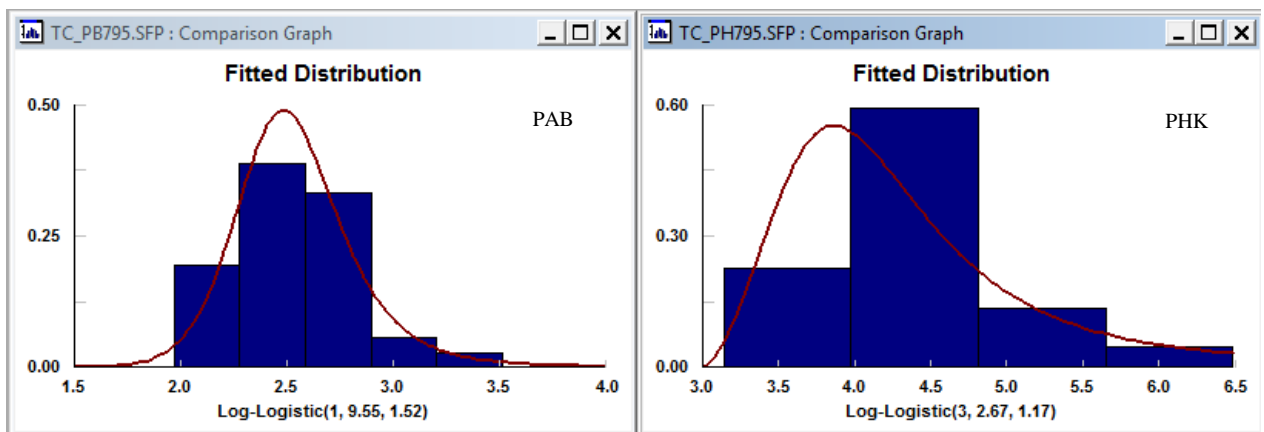


Figura 9.7: Histogramas tiempo de carga flota CAT 795.

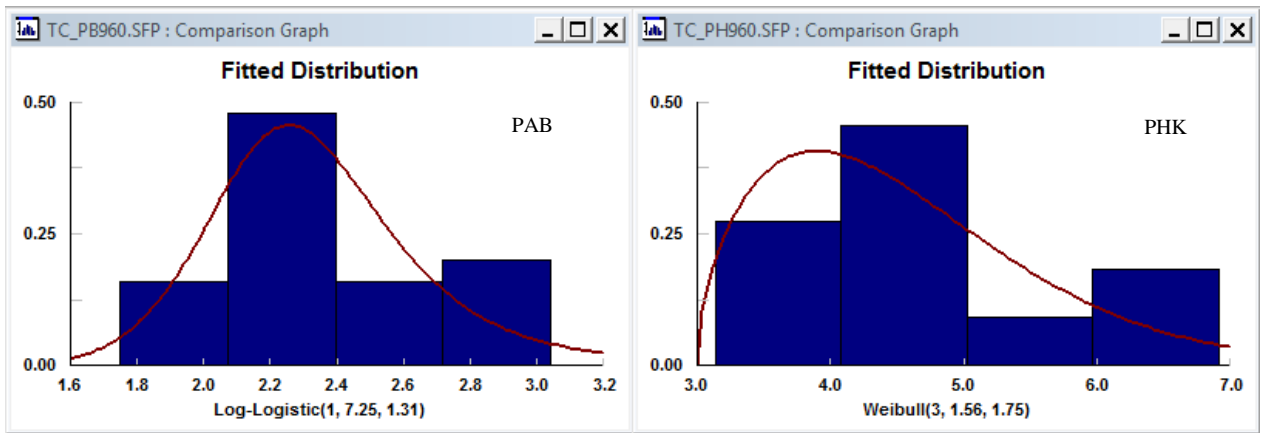


Figura 9.8: Histogramas tiempo de carga flota KOM 960E.

9.3.6 Habilitación equipos de carga

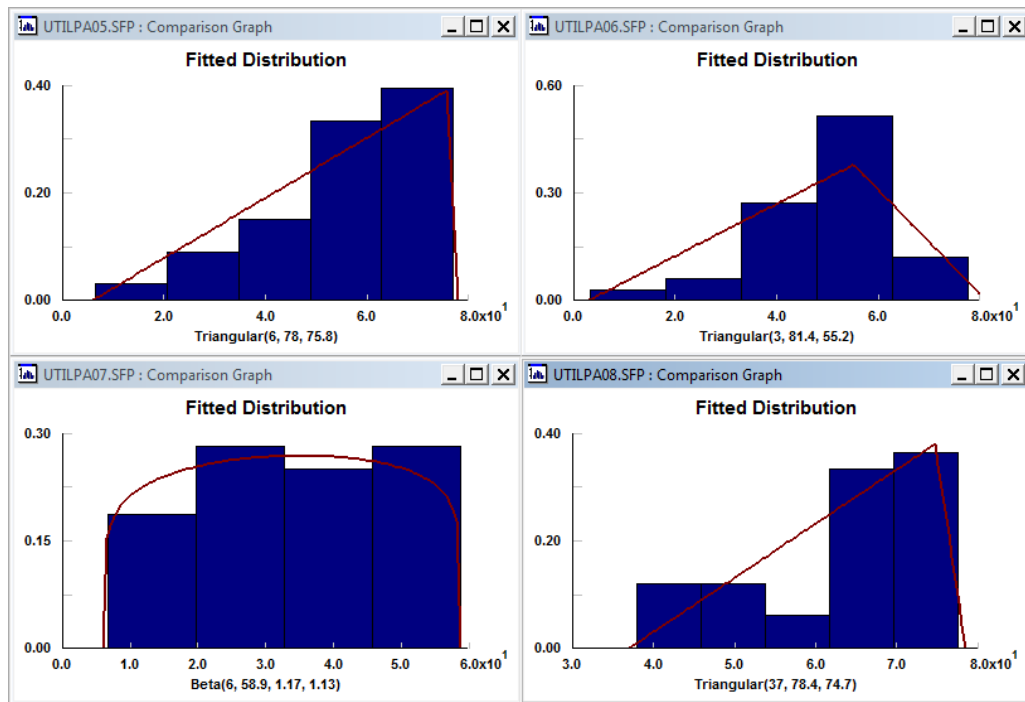


Figura 9.9: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PAB05, PAB06, PAB07, PAB08.

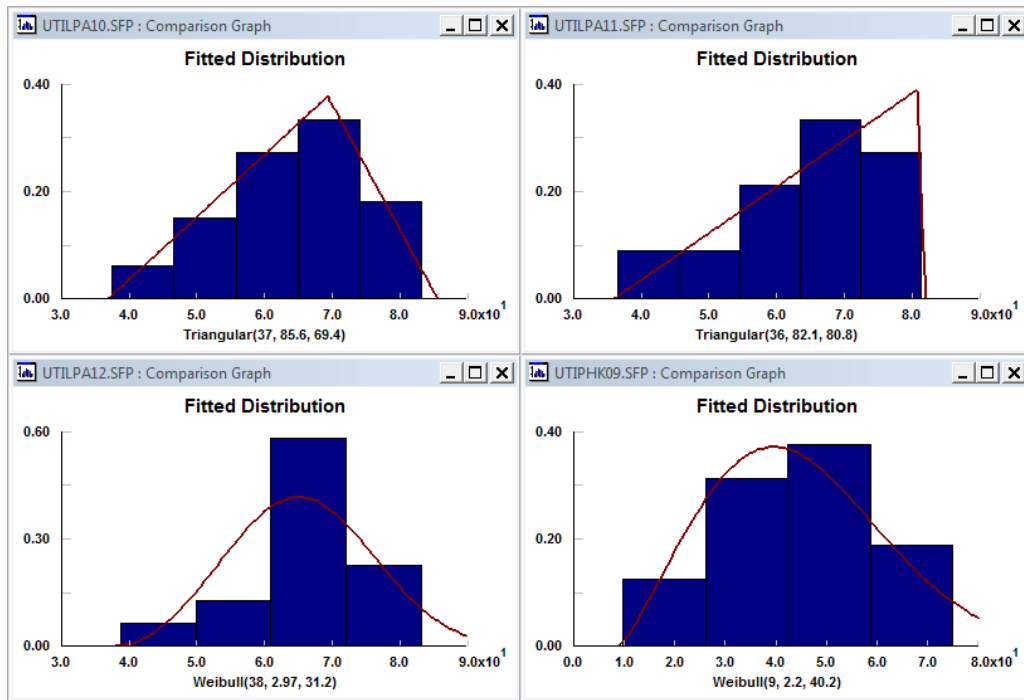


Figura 9.10: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PAB10, PAB11, PAB12, PHK09.

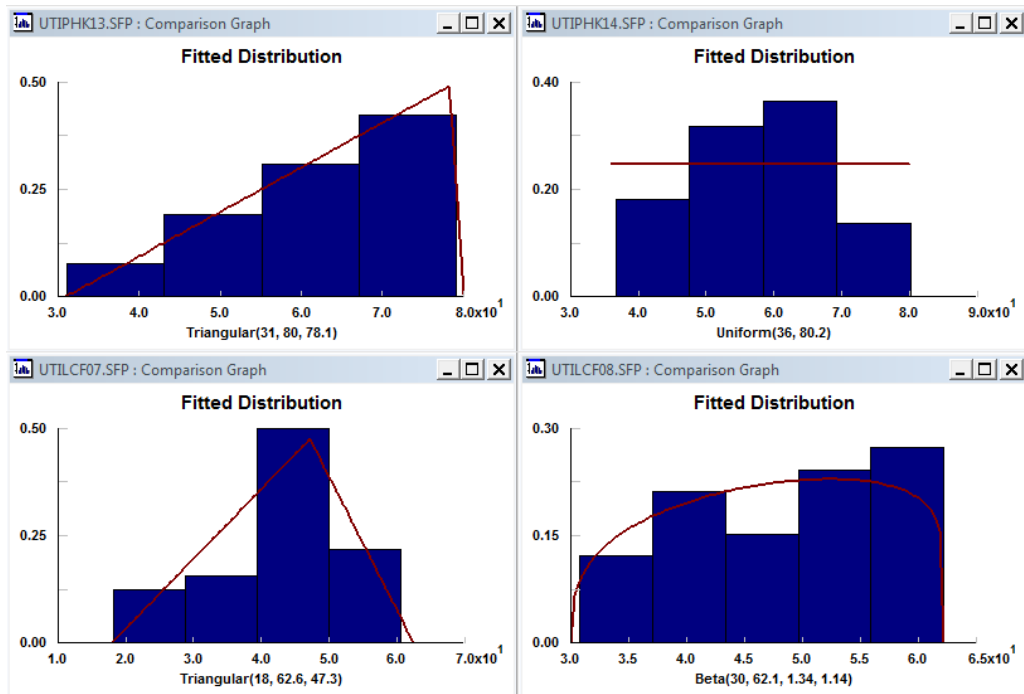


Figura 9.11: Histogramas habilitación equipos de carguío. Equipos: PHK13, PHK14, CFL07, CFL08.

9.4 Detalle de parámetros de distribuciones

A continuación se muestran las distribuciones utilizadas con la descripción de los parámetros que las describen. Se muestra cada distribución con la fórmula que la describe, parámetros y forma.

9.4.1 Beta

Distribución Beta (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 = mínimo valor de x

max = máximo valor de x

p = parámetro de forma menor > 0

q = parámetro de forma mayor > 0

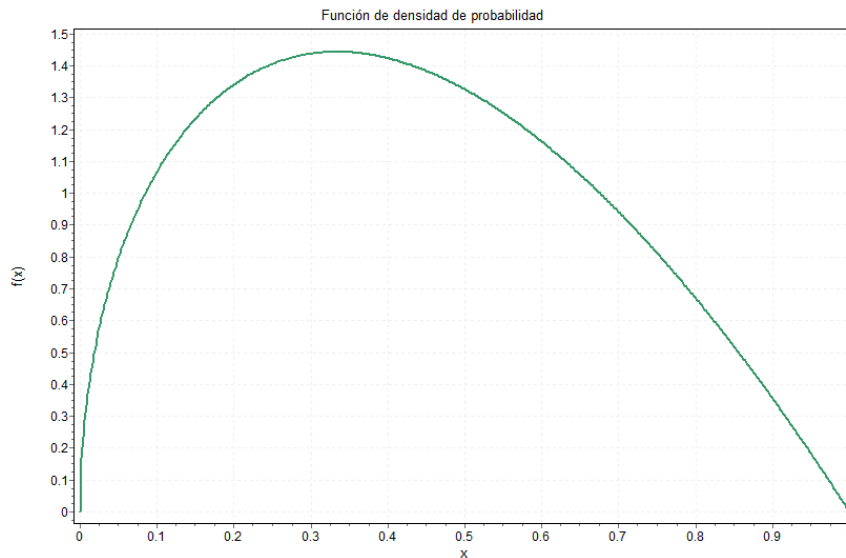


Figura 9.12: Distribución Beta. Parámetros (0, 1, 1.5, 2).

9.4.2 Gamma

Distribución Gamma (min, alpha, beta)

$$f(x) = \frac{(x - \min)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{[x - \min]}{\beta}\right)$$

min = mínimo valor de x

α = parámetro de forma > 0

β = parámetro de escala > 0

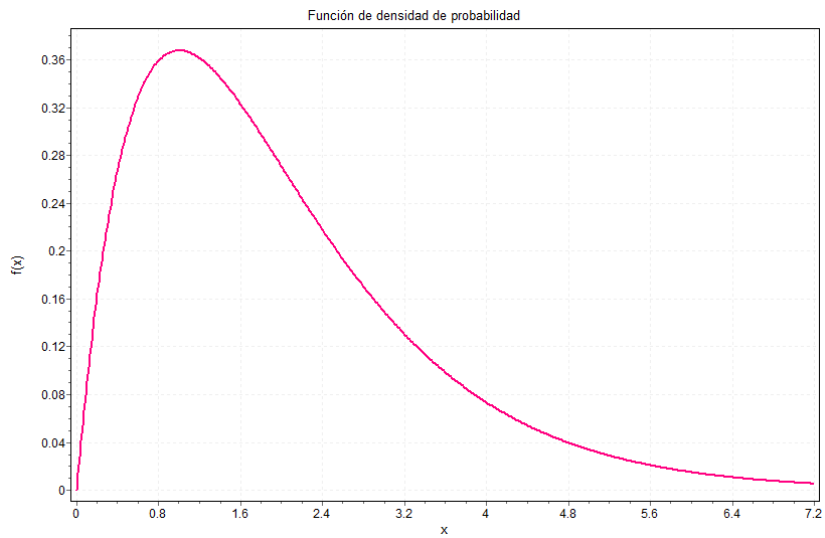


Figura 9.13: Distribución Gamma. Parámetros (0, 2, 1).

9.4.3 Log-Logistic

Distribución Log-Logistic (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 = mínimo valor de x
 p = parámetro de forma > 0
 β = parámetro de escala > 0

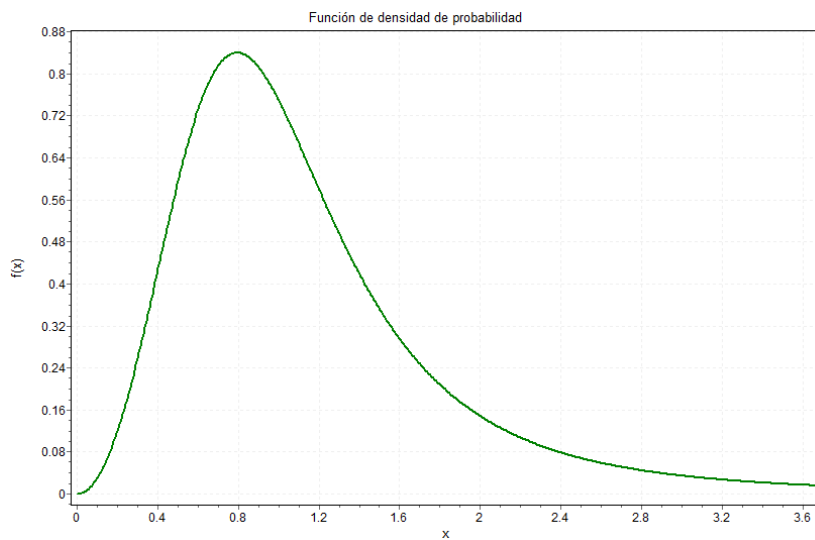


Figura 9.14: Distribución Log-Logistic. Parámetros (0, 3, 1).

9.4.4 Triangular

Distribución triangular (min, max, m)

$$f(x|a, b, c) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{para } a \leq x < c, \\ \frac{2}{b-a} & \text{para } x = c, \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{para } c < x \leq b, \\ 0 & \text{para otros casos} \end{cases}$$

min = mínimo valor de x (a)
max = máximo valor de x (b)
m = media (c)

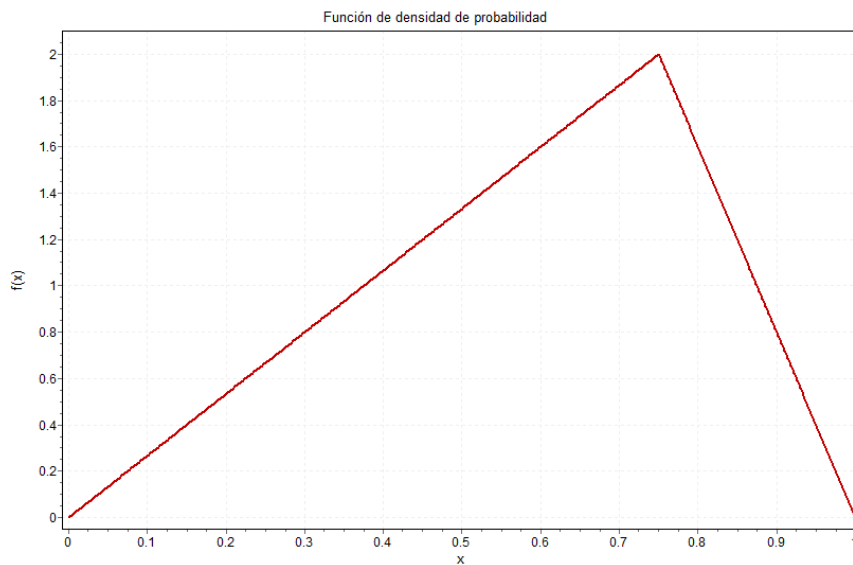


Figura 9.15: Distribución triangular. Parámetros (0, 1, 0,75).

9.4.5 Weibull

Distribución de Weibull (min, alpha, beta)

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \min}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left(- \left(\frac{[x - \min]}{\beta} \right)^{\alpha} \right)$$

min = mínimo valor de x
p = parámetro de forma > 0
 β = parámetro de escala > 0

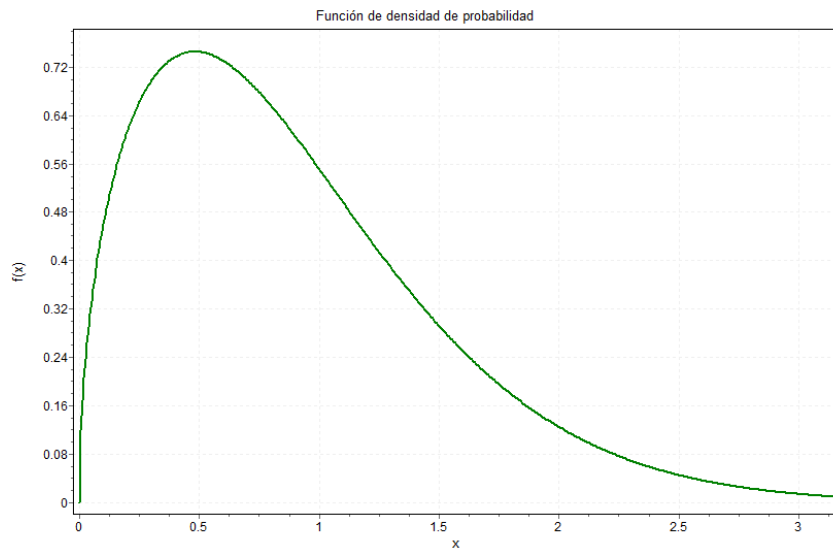


Figura 9.16: Distribución Weibull. Parámetros (0, 1, 5, 1).