

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 acuatamiento 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