

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances	3
1.4. Estructura del trabajo	4
2. Antecedentes	5
2.1. Planificación minera	5
2.1.1. Metodología tradicional de planificación a largo plazo en minas a cielo abierto	6
2.1.2. Agendamiento directo de bloques	11
2.2. Investigación de operaciones en la planificación de minas a cielo abierto	11
2.2.1. Problema del pit final	11
2.2.2. Problema del agendamiento de la producción	12
2.2.3. Heurísticas de resolución para el agendamiento minero	14
2.3. Geometalurgia	14
2.3.1. Desarrollo de programas geometalúrgicos	14
2.3.2. Variables geometalúrgicas	15
2.3.3. Incorporación de atributos geometalúrgicos en la planificación minera	18
2.4. Incertidumbre y riesgo en proyectos mineros	19
2.4.1. Incertidumbre geológica	20
2.4.2. Estimación versus Simulación Geoestadística	20
2.4.3. Incorporación de incertidumbre geológica en la planificación minera	23
2.5. MineLink	25
3. Metodología	27
3.1. Etapa 1: Definición del pit final	27
3.2. Etapa 2: Agendamiento de la producción	29
3.3. Evaluación de la incertidumbre	30
4. Análisis preliminar del caso de estudio	31
4.1. Generalidades	31
4.2. Análisis exploratorio del modelo de recursos	31
4.2.1. Base de datos a utilizar	32

4.2.2.	Ubicación y dimensiones espaciales	32
4.2.3.	Estadísticas básicas	34
4.2.4.	Histogramas	38
4.2.5.	Despliegue de modelos	40
4.2.6.	Relación espacial entre leyes y atributos geometalúrgicos	44
4.2.7.	Nubes de correlación	46
4.2.8.	Medidas de incertidumbre local	47
4.2.9.	Curvas tonelaje-ley	49
5.	Etapa 1: Definición de pits óptimos	53
5.1.	Criterios generales para la definición de los pit óptimos	53
5.1.1.	Términos de referencia	54
5.1.2.	Modelos de valorización económica	54
5.1.3.	Asignación de destinos	57
5.2.	Resultados definición de pits óptimos	60
5.2.1.	Comparación de estrategias	61
5.2.2.	Modelo de probabilidad para envolvente económica	66
6.	Etapa 2: Agendamiento de la producción a largo plazo	70
6.1.	Criterios generales para el agendamiento	70
6.1.1.	Modelo de agendamiento a largo plazo	70
6.1.2.	Estrategias de agendamiento	71
6.2.	Resultados secuenciamiento	73
6.2.1.	Efecto del número de simulaciones	73
6.2.2.	Comparación de estrategias	74
6.2.3.	Secuencia de extracción	75
6.2.4.	Flujos de caja	78
6.2.5.	Planes de extracción mina	79
6.2.6.	Vida útil mina	81
6.2.7.	Capacidades de procesamiento	82
6.2.8.	Contenido de finos y leyes en la alimentación a planta	84
7.	Análisis de incertidumbre y riesgo geológico	86
7.1.	Incertidumbre en pit finales	87
7.2.	Incertidumbre en planes de producción	91
7.2.1.	Incertidumbre en el tonelaje de mineral alimentado a planta	93
7.2.2.	Incertidumbre en tiempos de procesamiento	96
7.2.3.	Incertidumbre en leyes y finos contenidos en la alimentación	99
7.2.4.	Selección de planes	100
8.	Conclusiones y recomendaciones	105
	Bibliografía	109
	Anexo A. Heurística incremental por tiempos esperados	112
	Anexo B. Secuencias seleccionadas	115

Índice de Tablas

3.1.	Resumen de las estrategias utilizadas para definir el pit final	28
3.2.	Resumen de las estrategias utilizadas para definir la secuencia de extracción	29
4.1.	Atributos del modelo de recursos-geometalúrgico para el proceso de planificación	32
4.2.	Características del modelo de bloques original y del modelo de bloques extendido	34
4.3.	Estadísticas básicas de CuT para diferentes realizaciones y modelo E-type . .	37
4.4.	Estadísticas básicas de MoT para diferentes realizaciones y modelo E-type . .	37
4.5.	Estadísticas básicas de Rec para diferentes realizaciones y modelo E-type . .	38
4.6.	Estadísticas básicas de TPH para diferentes realizaciones y modelo E-type . .	38
4.7.	Estadísticas básicas para el coeficiente de variación condicional	48
4.8.	Diferencia en tonelajes de mineral y finos según el modelo E-type y realizaciones	51
4.9.	Variabilidad para el tonelaje de mineral y contenido de finos según ley de corte	51
4.10.	Tonelajes, leyes medias y cobre fino para diferentes leyes de corte	52
5.1.	Parámetros económicos para el proceso de planificación	54
5.2.	Parámetros técnicos para el proceso de planificación	54
5.3.	Notación de parámetros y variables utilizadas en las ecuaciones de valorización	57
5.4.	Cubicación del mineral y estéril obtenido al valorizar con los modelos E-type	59
5.5.	Estadísticas para el beneficio (MUS\$) de las envolventes óptimas según estrategia	61
5.6.	Estadísticas para el beneficio (MUS\$) revaluado de las estrategias E1 y E2 . .	62
5.7.	Estadísticas para los tonelajes y REM de las envolventes obtenidas	64
5.8.	Estadísticas para leyes medias y contenido de finos de las envolventes obtenidas	65
5.9.	Cubicación de tonelajes para pits definidos probabilísticamente	69
6.1.	Estadísticas para los VPN asociados a las secuencias optimizadas	75
7.1.	Estimación del Beneficio en los pits #33, #2 y E-type (ME)	88
7.2.	Estimaciones del tonelaje de mineral en los pits #33, #2 y E-type (ME) . .	89
7.3.	Estimaciones del cobre fino recuperable en los pits #33, #2 y E-type (ME) .	90
7.4.	Estimaciones de VPN en las secuencias #17, #11, #2 y E-type (ME)	92
7.5.	Secuencia E-type (S_ME_SCH2), detalle del tonelaje de mineral	95
7.6.	Secuencia R17 SCH3, detalle del tonelaje de mineral	95
7.7.	Secuencia E-type SCH3, detalle de tiempos de procesamiento	98
7.8.	Secuencia R17 SCH3, detalle de tiempos de procesamiento	98
7.9.	Comparación de secuencias seleccionadas por estrategia	103
7.10.	Resumen las secuencias seleccionadas por estrategia	104

Índice de Ilustraciones

2.1. Metodología tradicional de planificación a largo plazo	7
2.2. Secuencias de extracción Worst Case y Best Case	10
2.3. Ejemplo de precedencias (bloques 1, 2, 3, 4, 5 dan acceso al bloque 6)	12
2.4. Reconciliación de modelos de capacidad de procesamiento. (Fuente: Flores, 2005)	17
2.5. Comparación entre modelos estimados y simulados	22
2.6. Limitaciones de los modelos estimados en la planificación minera	23
2.7. Enfoque convencional versus Enfoque basado en riesgo. (Fuente: Heidari, 2015)	24
3.1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada	30
4.1. Topografía del caso de estudio	33
4.2. Gráfico de leyes medias de CuT por realización	34
4.3. Gráfico de varianzas de CuT por realización	35
4.4. Gráfico de leyes medias de MoT por realización	35
4.5. Gráfico de varianzas de MoT por realización	35
4.6. Gráfico de Rec promedio por realización	36
4.7. Gráfico de varianzas Rec por realización	36
4.8. Gráfico de TPH promedio por realización	36
4.9. Gráfico de varianzas TPH por realización	37
4.10. Histogramas de CuT, MoT, Rec y TPH	39
4.11. Vista 3D y planta (z=1265) para variable CuT	40
4.12. Secciones N-S y E-W para variable CuT	41
4.13. Vista 3D y planta (z=1265) para variable MoT	41
4.14. Secciones N-S y E-W para variable MoT	42
4.15. Vista 3D y planta (z=1265) para variable Rec	42
4.16. Secciones N-S y E-W para variable Rec	43
4.17. Vista 3D y planta (z=1265) para variable TPH	43
4.18. Secciones N-S y E-W para variable TPH	44
4.19. Nubes direccionales para las leyes CuT	45
4.20. Leyes de molibdeno (MoT) asociadas a las nubes direccionales de CuT	45
4.21. Recuperación de Cobre (Rec) asociada a las nubes direccionales de CuT	45
4.22. Capacidad de procesamiento asociada a las nubes direccionales de CuT	46
4.23. Nubes de correlación entre atributos	47
4.24. Varianza condicional y el coeficiente de variación en sección YZ (x=199 510)	48
4.25. Vistas en secciones y planta para el coeficiente de variación condicional	49
4.26. Curvas tonelaje-ley de recursos: tonelaje y ley media de Cu versus ley de corte	50

4.27.	Curvas tonelaje-ley para recursos: tonelaje y ley media de Mo versus ley de corte	50
4.28.	Contenido de finos de cobre y molibdeno en función de la ley de corte	51
5.1.	Beneficio económico de bloques en función de la ley de CuT	58
5.2.	Características del mineral cubicado según valorización	60
5.3.	Beneficio económico asociado a las envolventes óptimas obtenidas	61
5.4.	Histogramas para el beneficio económico (MUS\$) de las envolventes óptimas	63
5.5.	Tonelajes y REM de las envolventes óptimas según cada estrategia	64
5.6.	Leyes medias y contenido de finos de las envolventes óptimas	65
5.7.	Vistas en planta y perfil de los pits óptimos de la estrategia E1	67
5.8.	Vistas en planta y perfil de los pits óptimos de la estrategia E3	68
5.9.	Vistas en planta y perfil de los pits óptimos de la estrategia E5	68
6.1.	Efecto del número de simulaciones en las estadísticas del VPN	74
6.2.	VPN asociados a las secuencias optimizadas	74
6.3.	Vistas en planta y perfil para secuencias optimizadas con SCH3 (R11 y R2) .	76
6.4.	Vistas en planta y perfil para las secuencias optimizadas (modelos E-type) .	77
6.5.	Flujos de caja para secuencias R11, R37 y E-type	79
6.6.	Planes de producción para R11 y E-type	80
6.7.	Movimiento mina y VPN acumulados por periodo	81
6.8.	Vida útil mina (años) según estrategia	82
6.9.	Mineral a proceso por periodo	82
6.10.	Horas de procesamiento utilizadas por periodo	83
6.11.	Capacidad de procesamiento (en ton/hr) por periodo	84
6.12.	Contenido de finos y leyes (Cu y Mo) para la realización #37	85
7.1.	Esquema del procedimiento de evaluación de la incertidumbre	86
7.2.	Perfiles de Riesgo para el Beneficio de los pits obtenidos con la estrategia E3	87
7.3.	Perfiles de Riesgo para Mineral y REM (E3)	88
7.4.	Perfiles de Riesgo para ley media y finos de cobre (E3)	89
7.5.	Curva tonelaje-ley para reservas definidas por el PIT_1_SCH1	91
7.6.	Perfiles de Riesgo para VPN (SCH3)	91
7.7.	Planes de producción bajo incertidumbre geológica	94
7.8.	Incertidumbre en las horas de procesamiento por periodo	96
7.9.	Incertidumbre en leyes medias y finos de Cu y Mo por periodo (S_17_SCH1)	99
7.10.	Indicador de probabilidad de cumplimiento de los planes	101
7.11.	VPN esperado versus Indicador de probabilidad de cumplimiento	102
7.12.	Comparación de planes SEC_ME_SCH1 y SEC_37_SCH3	104
A.1.	Estrategia de ventanas de tiempo (Fuente: Jélvez, 2015)	112
B.1.	Vistas este-oeste de las secuencias seleccionadas por estrategia	115
B.2.	Vistas norte-sur de las secuencias seleccionadas por estrategia	116