

## TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación del trabajo .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Alcances .....	3
1.4 Metodología .....	4
1.5 Contenidos por capítulos .....	5
2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	6
2.1 Planificación minera .....	6
2.1.1 Planificación minera estratégica de largo plazo.....	6
2.1.2 Planificación minera táctica de largo plazo .....	7
2.2 Definición del problema de planificación de largo plazo.....	7
2.3 Metodologías de resolución del problema de planificación a largo plazo.....	8
2.3.1 Metodología tradicional de planificación a largo plazo.....	8
2.3.2 Metodología integral .....	8
2.4 Investigación de operaciones en minería a cielo abierto.....	9
2.4.1 Determinación del pit final.....	9
2.4.2 Secuenciamiento de bloques.....	10
2.5 Herramientas de planificación estratégica .....	12
2.5.1 <i>Whittle</i> .....	12
2.5.2 <i>NPV Scheduler</i> .....	15
2.5.3 <i>DeepMine</i> .....	16
2.5.4 <i>Blazor</i> .....	19
2.5.5 <i>DOPPLER</i> .....	21
2.5.6 <i>SimSched</i> .....	22
3 CASO DE ESTUDIO MODELO 05.....	23
3.1 Características generales del yacimiento.....	23
3.1.1 Límites y dimensiones .....	23
3.1.2 Estadísticas básicas .....	24
3.1.3 Curva tonelaje versus ley.....	24
3.1.4 Modelo geológico.....	25
3.2 Desarrollo de planes mineros.....	27
3.2.1 Desarrollo de planes con la metodología <i>Whittle</i> .....	28

3.2.2	Desarrollo de planes con la metodología <i>DeepMine</i> .....	30
3.3	Resultados .....	31
3.3.1	Resultados <i>Whittle</i> .....	31
3.3.2	Resultados <i>DeepMine</i> .....	35
3.4	Comparación de resultados .....	39
3.4.1	Pits anidados .....	39
3.4.2	Planes mineros .....	40
3.4.3	Fases y secuencias .....	42
3.4.4	Tiempo de procesamiento .....	42
4	CASO APLICADO MODELO 07.....	44
4.1	Características generales del yacimiento.....	44
4.1.1	Límites y dimensiones .....	44
4.1.2	Estadísticas básicas .....	45
4.1.3	Curva tonelaje versus ley.....	45
4.1.4	Modelo geológico.....	46
4.2	Desarrollo plan minero <i>DeepMine</i> .....	48
4.2.1	Resultados plan minero .....	49
4.3	Comparación con plan Codelco 2015 .....	50
4.3.1	Planes mineros .....	50
4.3.2	Fases y secuencia .....	52
5	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SOFTWARE <i>DEEPMINE</i> .....	54
5.1	Alcances de los modos de resolución .....	55
5.2	Concepto de costo de oportunidad .....	57
5.3	Vida del proyecto .....	58
5.4	Oportunidades de mejoras.....	61
5.4.1	Fases .....	61
5.4.2	Ley mínima a planta.....	62
5.4.3	Estabilidad .....	62
6	CONCLUSIONES.....	64
7	BIBLIOGRAFÍA .....	66

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema planificación minera tradicional.....	2
Ilustración 2. Proceso de planificación tradicional de largo plazo.....	8
Ilustración 3. Proceso de planificación integral de largo plazo.....	9
Ilustración 4. Ejemplo extracción <i>worst case</i> y <i>best case</i> .....	13
Ilustración 5. Esquema de solución de <i>DeepMine</i> .....	17
Ilustración 6. Árbol de generación de estados <i>DeepMine</i> .....	17
Ilustración 7. Proceso de optimización de software <i>Blazor</i> .....	19
Ilustración 8. Resultados obtenidos a través de DOPPLER con secuenciador BOS2M.....	21
Ilustración 9. Diagrama optimización <i>SimSched</i> .....	22
Ilustración 10. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).....	25
Ilustración 11. Perfil N-S. Este 503,988 (ley de cobre).....	25
Ilustración 12. Perfil E-O. Norte 521,850 (ley de cobre).....	26
Ilustración 13. Vista en planta. Cota 1,615 (ley de cobre).....	26
Ilustración 14. Metodología <i>Whittle</i> .....	28
Ilustración 15. Metodología <i>DeepMine</i> .....	30
Ilustración 16. Fases y secuencia <i>Whittle</i> .....	33
Ilustración 17. Fases y secuencia <i>DeepMine</i> .....	37
Ilustración 18. Vistas en planta fases <i>Whittle – DeepMine</i> .....	42
Ilustración 19. Vista 3D topografía del yacimiento (ley de cobre).....	46
Ilustración 20. Perfil N-S. Este 24,055 (ley de cobre).....	46
Ilustración 21. Perfil E-O. Norte 26,266 (ley de cobre).....	47
Ilustración 22. Vista en planta. Cota 3,324 (ley de cobre).....	47
Ilustración 23. Secuencia de fases - Plan Codelco 2015.....	52
Ilustración 24. Secuencia de fases - Plan <i>DeepMine</i> .....	52
Ilustración 25. Gráficos de ejercicios variando la vida de la mina. Modo <i>Deep</i> .....	59
Ilustración 26. Fases infactibles y de ínfimo tonelaje.....	61
Ilustración 27. Vista pit final (Fase 11 y fase 10). Plan LOM 20 años.....	61
Ilustración 28. Ejemplo de falla en una corrida de planes.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites y dimensiones del modelo de bloques. ....	23
Tabla 2. Resumen cantidad de bloques del yacimiento. ....	23
Tabla 3. Estadística básica. ....	24
Tabla 4. Parámetros relevantes plan minero modelo 05. ....	27
Tabla 5. Resultados plan minero <i>Whittle</i> . ....	32
Tabla 6. Tiempo de procesamiento <i>Whittle</i> . ....	34
Tabla 7. Resultados plan minero <i>DeepMine</i> . ....	36
Tabla 8. Tiempos de procesamiento <i>DeepMine</i> . ....	38
Tabla 9. Diferencias pits anidados entre <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	40
Tabla 10. Tabla comparativa planes <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	41
Tabla 11. Comparación tiempos de procesamiento. ....	43
Tabla 12. Límites y dimensiones del modelo de bloques. ....	44
Tabla 13. Resumen cantidad de bloques del yacimiento. ....	44
Tabla 14. Estadística básica. ....	45
Tabla 15. Parámetros relevantes plan minero modelo 07. ....	48
Tabla 16. Resultados plan minero estratégico <i>DeepMine</i> . ....	49
Tabla 17. Comparación planes mineros. ....	50
Tabla 18. Tabla comparativa entre planes <i>Quick</i> , <i>Balanced</i> y <i>Deep mode</i> . ....	56
Tabla 19. Resumen fase 11, plan <i>Deep</i> 20 años. ....	61
Tabla 20. Ejercicio ley mínima a planta. ....	62
Tabla 21. Estadísticas de leyes por litología. ....	69
Tabla 22. Estadísticas de leyes por litología. ....	71
Tabla 23. Inputs sección “ <i>New block model</i> ”. ....	73
Tabla 24. Inputs sección “ <i>New slope set</i> ”. ....	73
Tabla 25. Inputs sección “ <i>Pit collections</i> ”. ....	73
Tabla 26. Inputs sección “ <i>Operational scenario</i> ”. ....	74
Tabla 27. Inputs sección “ <i>Pit by pit graph</i> ”. ....	74
Tabla 28. Inputs sección “ <i>New schedule graph</i> ”. ....	75
Tabla 29. Parámetros “ <i>Geo models</i> ”. ....	76
Tabla 30. Parámetros “ <i>Pit collections</i> ”. ....	76
Tabla 31. Parámetros “ <i>Mining environments</i> ”. ....	77
Tabla 32. Parámetros “ <i>Economic environments</i> ”. ....	77
Tabla 33. Parámetros “ <i>Mine plans</i> ”. ....	78
Tabla 34. Resultados pits anidados <i>Whittle</i> y <i>DeepMine</i> . ....	80
Tabla 35. Tabla datos VAN-Ritmo. ....	82
Tabla 36. Resumen fases – <i>Whittle</i> . ....	83
Tabla 37. Resumen fases – <i>DeepMine</i> . ....	83

## ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1. Ejemplo gráfico pit by pit ( <i>best case</i> y <i>worst case</i> ).....	13
Gráfico 2. Curva tonelaje versus ley para el cobre.....	24
Gráfico 3. Gráfico pit by pit <i>Whittle</i> .....	29
Gráfico 4. Resumen pits anidados – <i>Whittle</i> .....	31
Gráfico 5. Plan minero <i>Whittle</i> .....	32
Gráfico 6. Flujo de caja descontado <i>Whittle</i> (sin inversión).....	33
Gráfico 7. Resumen pit anidados – <i>DeepMine</i> .....	35
Gráfico 8. Plan minero <i>DeepMine</i> .....	36
Gráfico 9. Flujo de caja descontado <i>DeepMine</i> (sin inversión).....	37
Gráfico 10. Diferencias en tonelajes de los pits anidados.....	39
Gráfico 11. Diferencias en leyes y REM de los pits anidados.....	40
Gráfico 12. Comparación ley de cabeza por año (modelo 05).....	41
Gráfico 13. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 05).....	41
Gráfico 14. Curva tonelaje versus ley para el cobre.....	45
Gráfico 15. Movimiento total - Plan <i>DeepMine</i> .....	49
Gráfico 16. Comparación de mineral a planta.....	50
Gráfico 17. Comparación ley de cabeza por año (modelo 07).....	51
Gráfico 18. VAN Acumulado [MUS\$] (modelo 07).....	51
Gráfico 19. Movimiento mina – Modo <i>Quick</i> .....	55
Gráfico 20. Movimiento mina – Modo <i>Balanced</i> .....	55
Gráfico 21. Movimiento mina – Modo <i>Deep</i> .....	56
Gráfico 22. VAN y tiempo de procesamiento por modo de resolución.....	57
Gráfico 23. Planes costo de oportunidad.....	58
Gráfico 24. Van acumulado por año. Planes <i>Deep</i> 10,20 y 30 años.....	60
Gráfico 25. Histograma de frecuencia por litología.....	69
Gráfico 26. Ley promedio de Cobre por litología.....	70
Gráfico 27. Histograma de frecuencia por litología.....	71
Gráfico 28. Ley promedio de Cobre por litología.....	72
Gráfico 29. <i>Pit by pit graph</i> .....	75
Gráfico 30. Curva VAN-Ritmo – <i>Whittle</i> .....	81
Gráfico 31. Curva VAN-Ritmo – <i>DeepMine</i> .....	81
Gráfico 32. Agotamiento de mineral- <i>Whittle</i> .....	84
Gráfico 33. Agotamiento de mineral – <i>DeepMine</i> .....	84
Gráfico 34. Inversión mina.....	85
Gráfico 35. Inversión planta.....	85