

# TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
1.1.3. Alcances.....	3
2. ANTECEDENTES .....	4
2.1. Planificación Minera .....	4
2.2. Planificación minera estratégica.....	6
2.3. Planificación minera estratégica a cielo abierto.....	7
2.3.1. Enfoque integrado.....	7
2.3.2. Enfoque tradicional.....	8
2.3.3. Valorización del modelo de recursos mediante la configuración de los parámetros de entrada.....	9
2.3.4. Determinación de los límites de pit final utilizando restricciones geométricas y/o geomecánicas .....	10
2.3.5. Tasas de producción y leyes de corte.....	11
2.3.6. Elección del secuenciamiento de fases preliminares o <i>pushbacks</i> .....	12
2.3.7. Indicadores de desempeño utilizados en la evaluación de planes mineros a cielo abierto	16
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA.....	19
3.1. Interpretar objetivos estratégicos .....	20
3.2. Plantear escenarios de planificación .....	22
3.3. Ejecutar los escenarios y almacenar los resultados.....	31
3.4. Evaluar el rendimiento de las opciones.....	33
3.5. Seleccionar el Pit final.....	35
4. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	38
5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	41
5.1. Descripción del yacimiento de estudio.....	41
5.2. Interpretar objetivos estratégicos .....	46
5.3. Plantear escenarios de planificación .....	47

5.3.1.	Rango de tamaños posibles del pit final .....	48
5.3.2.	Capacidades de mina.....	48
5.3.3.	Leyes de corte .....	49
5.3.4.	Consideraciones geométricas y de geometría de las fases.....	49
5.3.5.	Inversión estimada .....	51
5.4.	Ejecutar los escenarios y almacenar los resultados.....	52
5.5.	Evaluar el rendimiento de las opciones.....	53
5.5.1.	Análisis de acuerdo a la ley de corte.....	53
5.5.2.	Análisis de acuerdo a la capacidad de minado.....	56
5.5.3.	Análisis de acuerdo al tamaño del pit final .....	58
5.5.4.	Análisis de acuerdo a la geometría (número de fases).....	60
5.5.5.	Análisis de los planes mineros obtenidos para el mejor caso con el pit final de 743 Mt (RF 1) y el mejor caso con el pit final de 617 Mt .....	61
5.6.	Seleccionar el pit final.....	63
6.	DISCUSIÓN .....	64
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
7.1.	Conclusiones con respecto a la propuesta de la metodología .....	67
7.2.	Conclusiones con respecto al caso de estudio.....	68
7.3.	Recomendaciones.....	68
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	69
9.	ANEXO.....	72

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1.	Fórmula del valor presente neto .....	17
Ecuación 2-2.	Fórmula del índice del valor actual neto.....	17
Ecuación 3-1.	Función polinómica aplicada para estimar la inversión asociada a cada punto de diseño .....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Gráfico Pit anidado por Pit anidado .....	2
Figura 2-1.	Etapas consecutivas en el proceso de planificación minera.....	9

Figura 2-2. Escalando la colina de valor (Hill of value), (Hall, B. E., 2003) .....	12
Figura 2-3. Esquema de extracción Best case.....	13
Figura 2-4. Esquema de extracción Worst case .....	14
Figura 2-5. Planes mineros generados por los secuenciamientos del Best case (izq.) y del Worst case (der.), obtenidos por (Smith, 2001).....	14
Figura 2-6. Planes mineros generados por los algoritmos <i>Milawa Balanced</i> (izq.) y <i>Milawa NPV</i> (der.), obtenidos por (Smith, 2001).....	15
Figura 3-1. Pasos generales de la metodología propuesta .....	20
Figura 3-2. Indicadores estratégicos a priorizar para los objetivos de rentabilidad mínima exigida (izq.), maximizar la riqueza de los accionistas (centro) y mantener una posición de liderazgo en el mercado (der.) .....	21
Figura 3-3. Indicadores estratégicos a priorizar para los objetivos de mantener una posición de estabilidad en el mercado (izq.), maximizar la recuperación de reservas (centro) y obtener flujos de caja positivos anticipadamente (der.).....	22
Figura 3-4. Indicadores estratégicos a priorizar para el objetivo de copar la capacidad de los activos. ....	22
Figura 3-5. Gráfico Pit anidado por Pit anidado .....	24
Figura 3-6. Curva tonelaje-ley del Pit a Revenue Factor 1 para un yacimiento de Cu particular	25
Figura 3-7. Plan minero estratégico obtenido mediante el algoritmo <i>Milawa NPV</i> y sin limitar la capacidad de minado a leyes marginales y sin considerar el uso de <i>stockpiles</i> .....	26
Figura 3-8. Plan minero estratégico obtenido mediante el algoritmo <i>Milawa NPV</i> y sin limitar la capacidad de minado, a leyes marginales y sin considerar el uso de <i>stockpiles</i> .....	26
Figura 3-9. Regresión polinomial ajustada a los datos de inversión en plantas de procesamiento según informe de (COCHILCO, 2015).....	27
Figura 3-10. Curva tonelaje-ley del Pit a Revenue Factor 1 para un yacimiento de Cu particular .....	29
Figura 3-11. Vista de perfil Este-Elevación del modelo de recursos utilizado como ejemplo para determinar la curva tonelaje-ley de la figura 3.10, filtrado por una ley de 1.6% Cu.....	30
Figura 3-12. Visualización de perfil, considerando 6 envolventes anidadas como <i>pushbacks</i> ....	31
Figura 3-13. Plan minero estratégico para un pit final de 687 Mt utilizando una capacidad de minado de 50 Mt/año y una ley de corte fija de 0.45%Cu mediante el algoritmo <i>Milawa NPV</i> .	32
Figura 3-14. Ejemplo de gráfico de superficie: Colina de valor (VPN) para distintas capacidades de minado y distintos valores de leyes de corte para el Cu .....	34
Figura 3-15. Ejemplo de gráfico tipo: Curvas de valor (VPN) en función de la capacidad de minado para distintos valores de leyes de corte de Cu .....	35
Figura 3-16. Costo caja promedio, para distintas envolventes finales, a una tasa de minado de 70 Mt/año .....	36
Figura 3-17. Toneladas de Cu fino producido al año, para distintas envolventes finales, a distintas leyes de corte de Cu.....	37
Figura 3-18. Toneladas totales de Cu fino producido a lo largo de la vida de la explotación, para distintas envolventes finales, a distintas leyes de corte de Cu.....	37

Figura 5-1. Curva Tonelaje-Ley de Cu del yacimiento completo para el mineral de sulfuro primario.....	42
Figura 5-2. Perfiles Este-Elevación del modelo filtrado por la ley de Au marginal (izq.) y por la ley de Ag marginal (der.) .....	43
Figura 5-3. Perfil Este-Elevación del yacimiento filtrado por la ley de corte marginal de cobre	44
Figura 5-4. Vista isométrica desde el Nor-Este del modelo de recursos filtrado por la ley de corte marginal de cobre.....	44
Figura 5-5. Vista en planta sin topografía mostrando un corte en la coordenada 125,000 Este...	45
Figura 5-6. Corte sección vertical en la coordenada 125,000 Este .....	45
Figura 5-7. Vistas en planta para las cotas 4,000 (izq.) y 4,100 (der.) .....	45
Figura 5-8. Perfil Este-Elevación del yacimiento filtrado por la ley de corte marginal de cobre	46
Figura 5-9. Perfil Norte-Elevación del yacimiento filtrado por la ley de corte marginal de cobre .....	46
Figura 5-10. Plan minero estratégico para el Pit a RF 1 del yacimiento de estudio obtenido mediante el algoritmo <i>Milawa NPV</i> y sin limitar la capacidad de minado, a leyes marginales y sin considerar el uso de <i>stockpiles</i> .....	48
Figura 5-11. Curva tonelaje-ley del Pit a Revenue Factor 1 para el yacimiento en estudio.....	49
Figura 5-12. Visualización de perfil, considerando 4 envolventes anidadas como <i>pushbacks</i> , para el pit a RF 1 .....	50
Figura 5-13. Flujo de trabajo seguido en la aplicación de la metodología propuesta mediante el software GEOVIA Whittle .....	51
Figura 5-14. VPN para distintas tasas de minado y a una ley de 0.15% Cu.....	54
Figura 5-15. VPN para distintas tasas de minado y a una ley de 0.25% Cu.....	54
Figura 5-16. VPN para distintas tasas de minado y a una ley de 0.45% Cu.....	55
Figura 5-17. <i>Payback</i> descontado para distintas tasas de minado y a una ley de 0.65% Cu.....	55
Figura 5-18. Superficie de valor (VPN) para distintos tamaños de <i>pit</i> final y tasas de minado a una ley de 0.55% Cu .....	56
Figura 5-19. Superficie de valor (VPN) para distintos tamaños de <i>pit</i> final y leyes de corte para el Cu, a una tasa de minado de 50 Mt/año .....	57
Figura 5-20. Superficie de valor (VPN) para distintos tamaños de pit final y leyes de corte para el Cu, a una tasa de minado de 60 Mt/año .....	57
Figura 5-21. VPN por tamaño de pit final a distintas leyes de corte para el Cu, y para una capacidad de minado de 70 Mt/año .....	58
Figura 5-22. Superficie de valor (VPN) considerando una envolvente final de 514 Mt para distintas capacidades de minado y leyes de corte para el Cu.....	59
Figura 5-23. Superficie de valor (VPN) considerando una envolvente final de 617 Mt para distintas capacidades de minado y leyes de corte para el Cu.....	59
Figura 5-24. Superficie de valor (VPN) considerando una envolvente final de 743 Mt para distintas capacidades de minado y leyes de corte para el Cu.....	60
Figura 5-25. Visualización en planta de las fases preliminares óptimas obtenidas para el pit final de tamaño 617 Mt utilizando 4 fases (izq.) y 5 fases (der.).....	61

Figura 5-26. Visualización en perfil Norte-Cota de las fases preliminares óptimas obtenidas para el pit final de tamaño 617 Mt utilizando 4 fases (superior) y 5 fases (inferior) .....	61
Figura 5-27. Plan minero estratégico para el pit final de 617 Mt utilizando una capacidad de minado de 70 Mt/año y una ley de corte fija de 0.65%Cu.....	62
Figura 5-28. Plan minero estratégico para el pit final de 743 Mt utilizando una capacidad de minado de 70 Mt/año y una ley de corte fija de 0.65%Cu.....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Enfoques de cada subgrupo en planificación .....	5
Tabla 2-2. Objetivos estratégicos de algunas compañías mineras.....	6
Tabla 3-1. Variables y parámetros de entrada utilizados en planificación minera estratégica a cielo abierto.....	19
Tabla 3-2. Ejemplo de matriz de experimentos .....	23
Tabla 3-3. Estimación del CAPEX para distintos escenarios de capacidad de procesamiento, minado y tamaño de la envolvente final. ....	28
Tabla 3-4. Ejemplo de tabla tipo, para almacenar los resultados obtenidos de cada escenario planteado.....	32
5-1. Información del yacimiento completo.....	41
Tabla 5-2: Parámetros técnico-económicos.....	42
Tabla 5-3: Parámetros técnico-económicos.....	42
Tabla 5-4. Estimación del CAPEX para distintos escenarios de capacidad de procesamiento, minado y tamaño de la envolvente final. ....	52
Tabla 5-5. Extracto de la tabla usada para almacenar los resultados de los 1,800 escenarios de planificación.....	52