

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Descripción del problema.....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.2.1.	Objetivo general.....	2
1.2.2.	Objetivos específicos .....	2
1.3.	Alcances .....	3
1.4.	Metodología .....	3
1.5.	Organización de la memoria .....	3
2.	ANTECEDENTES .....	5
2.1.	Métodos de extracción subterránea.....	5
2.1.1.	Cut & Fill .....	5
2.1.2.	Bench & Fill.....	7
2.2.	Sistemas de acceso a minas subterráneas .....	8
2.3.	Mecanismos de transporte en minas subterránea .....	9
2.4.	Construcción de túneles en minería subterránea .....	10
2.5.	Ventilación en minería subterránea.....	11
2.6.	Optimización de rutas.....	11
2.7.	Estudios de optimización de rutas aplicados en industrias .....	13
2.8.	Estudios de optimización de rutas aplicados en industria minera.....	15
3.	METODOLOGÍA .....	20
3.1.	Revisión bibliográfica .....	20
3.2.	Adaptación del modelo.....	20
3.3.	Validación .....	20
3.4.	Aplicación a un caso de estudio .....	21
3.5.	Análisis y conclusiones .....	21
4.	MODELO RAMPA MINA SUBTERRÁNEA .....	22
4.1.	Análisis del modelo para minería cielo abierto.....	22
4.2.	Bases del modelo para minería subterránea .....	24
4.3.	Bases del modelo matemático .....	25
4.4.	Funcionamiento del modelo para minería subterránea .....	27
4.5.	Robustez del modelo .....	29
5.	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	31
5.1.	Valores de inputs iniciales.....	31

5.2.	Validación del cálculo de costos .....	32
5.3.	Validación del comportamiento de los inputs del modelo .....	33
5.3.1.	Frontera .....	34
5.3.2.	Pendiente.....	36
5.3.3.	Sentido .....	39
5.3.4.	Punto de inicio .....	40
5.3.5.	Costo de desarrollo .....	43
5.3.6.	Costo de acarreo.....	47
5.3.7.	Tonelaje asociado a los niveles de producción .....	50
5.3.8.	Cantidad de niveles de producción .....	52
5.4.	Validación de soluciones al cambiar cuerpo guía en el modelo .....	55
5.5.	Análisis.....	56
6.	CASO DE ESTUDIO .....	58
6.1.	Antecedentes generales .....	58
6.2.	Alcances .....	60
6.3.	Resultados .....	60
6.3.1.	Zona Y este .....	60
6.3.2.	Zona Y oeste inferior .....	62
6.3.3.	Zona Y oeste superior .....	63
6.4.	Alternativas al caso de estudio .....	66
6.4.1.	Aplicación en zona Y este.....	66
6.4.2.	Aplicación en zona Y oeste inferior.....	68
6.4.3.	Aplicación en zona Y oeste superior .....	70
6.4.4.	Variante de pendiente en zonas de estudio .....	73
6.5.	Análisis.....	79
7.	CONCLUSIONES .....	80
8.	RECOMENDACIONES.....	82
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	83
10.	ANEXO.....	85
10.1.	Modelo Matemático.....	85
10.2.	Validación del modelo.....	88
10.2.1.	Validación del comportamiento de inputs del modelo.....	88

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Función objetivo del problema general de camino más corto. ....	12
Ecuación 2.2. Restricciones del problema general de camino más corto. ....	12
Ecuación 2.3. Función objetivo al problema de minimizar la ruta y el costo de extracción. ....	15
Ecuación 2.4. Restricciones al problema de minimizar la ruta y el costo de extracción. ....	15
Ecuación 2.5. Costo por metro de rampa.....	17
Ecuación 2.6. Costo por metro de pique. ....	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema del problema de diseño de accesos mina. Brazil 2014. ....	2
Figura 2.1. Cut & Fill, Hustrulid 2001. ....	6
Figura 2.2. Esquema Bench & Fill, Darling 2011. ....	8
Figura 2.3. Ciclo de excavación subterránea (Vargas et al. 2014). ....	10
Figura 2.4. Ejemplo de problema de camino más corto. Sobre los arcos se indica la distancia. Amaya 2012. ....	12
Figura 2.5. Gráfico de flujo de Dijkstra (1959) del algoritmo de ruta más corta aplicado de un problema de acceso único. ....	14
Figura 2.6. Red simple de los tramos. Brazil 2002. ....	17
Figura 2.7. Diseños propuestos por DOT1 y DOT2. Brazil 2007. ....	18
Figura 3.1. Metodología de trabajo. ....	20
Figura 4.1. Vista isométrica del pit final de la valorización económica de la mina. ....	22
Figura 4.2. Vista isométrica del diseño de rampa obtenido al maximizar el beneficio económico en el modelo de rampas. ....	23
Figura 4.3. Vista del modelo conjunto de rampa y pit final. ....	23
Figura 4.4. Diagrama entrada y salida modelo de optimización. ....	26
Figura 4.5. Funcionamiento del modelo de optimización. ....	30
Figura 5.1. Vista isométrica del caso de validación de cálculos del modelo. ....	32
Figura 5.2. Vista isométrica del resultado de rampa en caso base de validación. ....	34
Figura 5.3. Vista isométrica de resultados de variación de frontera, 1 y 3 capas. ....	35
Figura 5.4. Vista isométrica de resultado de variación de frontera, 5 capas. ....	35
Figura 5.5. Vista isométrica de resultados de variación de pendiente, 7.5% y 10%. ....	37
Figura 5.6. Vista isométrica de resultado de variación de pendiente, 15%. ....	37
Figura 5.7. Vista isométrica de resultados de variación de sentido. ....	39
Figura 5.8. Vista superior de ubicación de puntos iniciales. ....	41
Figura 5.9. Vista isométrica de resultados de variación de punto de inicio, casos 1 y 2. ....	41
Figura 5.10. Vista isométrica de resultados de variación de punto de inicio, casos 3 y 4. ....	42
Figura 5.11. Vista isométrica de resultados de variación de costo de construcción rampa, casos 1 y 2. ....	43
Figura 5.12. Vista isométrica de resultados de variación de costo de construcción rampa, casos 3 y 4. ....	44
Figura 5.13. Vista isométrica de resultados de variación de costo de construcción cruzados, casos 1 y 2. ....	45
Figura 5.14. Vista isométrica de resultados de variación de costo de construcción cruzados, casos 3 y 4. ....	46

Figura 5.15. Vista isométrica de resultados de variación de costo de acarreo 0% a 5% de pendiente, casos 1 y 2.....	47
Figura 5.16. Vista isométrica de resultados de variación de costo de acarreo 0% a 5% de pendiente, casos 3 y 2.....	48
Figura 5.17. Vista isométrica de resultados de variación de costo de acarreo 5% a 10% de pendiente, casos 1 y 2. ....	49
Figura 5.18. Vista isométrica de resultados de variación de costo de acarreo 5% a 10% de pendiente, casos 3 y 4. ....	49
Figura 5.19. Vista isométrica de resultados de variación de tonelaje en niveles de producción, casos 1 y 2.....	51
Figura 5.20. Vista isométrica de resultado de variación de tonelaje en niveles de producción, caso 3.....	51
Figura 5.21. Vista isométrica de resultado de variación cantidad de niveles de producción, caso 7 y 5 niveles. ....	53
Figura 5.22. Vista isométrica de resultado de variación cantidad de niveles de producción, caso 3 niveles. ....	54
Figura 5.23. Vista isométrica de resultados de variación forma guía de rampa, caso 1 y 2. ....	56
Figura 5.24. Vista isométrica de resultados de variación forma guía de rampa, caso 3 y 4. ....	56
Figura 6.1. Vista en planta del depósito epitelial.....	58
Figura 6.2. Vista isométrica de niveles 1,187 y 1,199, Mina Y este. ....	59
Figura 6.3. Layout mina informe de prefactibilidad. ....	60
Figura 6.4. Vista lateral de resultado réplica zona Y este.....	61
Figura 6.5. Vista lateral de resultado réplica zona Y oeste inferior.....	63
Figura 6.6. Vista lateral de resultado réplica zona Y oeste superior.....	64
Figura 6.7. Visualización de diseños reales y reproducción con modelo en las tres zonas. ....	65
Figura 6.8. Vista lateral de resultados de rampas zona Y este.....	66
Figura 6.9. Vista lateral réplica de rampa caso de estudio zona Y este. ....	67
Figura 6.10. Comparación caso inicial y caso 2, zona Y este.....	68
Figura 6.11. Vista lateral de visualización resultados de rampas zona Y oeste inferior.....	69
Figura 6.12. Vista lateral réplica de rampa caso de estudio zona Y oeste inferior. ....	69
Figura 6.13. Comparación caso inicial y caso 2, zona Y oeste inferior.....	70
Figura 6.14. Vista lateral de visualización resultado de rampa y réplica de caso de estudio zona Y oeste superior. ....	71
Figura 6.15. Comparación caso inicial y caso 1, zona Y oeste superior.....	72
Figura 6.16. Comparación de las tres zonas caso inicial y caso propuesto. ....	73
Figura 6.17. Vista lateral de resultados rampa zona Y este con pendiente 10%. ....	74
Figura 6.18. Comparación de los resultados de zona Y este con pendiente 10%.....	75
Figura 6.19. Vista lateral de resultados rampa zona Y oeste inferior con pendiente 10%. ....	76
Figura 6.20. Comparación de los resultados de zona Y oeste inferior con pendiente 10%.....	77
Figura 6.21. Vista lateral de resultados rampa zona Y oeste superior con pendiente 10%. ....	78
Figura 6.22. Comparación de los resultados de zona Y oeste superior con pendiente 10%.....	78

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1. Comparación de metros construidos caso frontera.....	36
Gráfico 5.2. Validación resultados de costos, caso frontera.....	36
Gráfico 5.3. Validación resultados metros construidos, caso pendiente.....	38
Gráfico 5.4. Validación resultados de costos, caso pendiente.....	38
Gráfico 5.5. Validación resultados metros construidos, caso sentido.....	40
Gráfico 5.6. Validación resultados de costos, caso sentido.....	40
Gráfico 5.7. Validación resultados metros construidos, caso punto de inicio.....	42
Gráfico 5.8. Validación resultados metros construidos, caso costo de construcción rampa.....	44
Gráfico 5.9. Validación resultados metros construidos, caso costo de construcción cruzados. ...	46
Gráfico 5.10. Validación resultados metros construidos, caso costo acarreo pendiente 5% a 10%. .....	50
Gráfico 5.11. Validación resultados metros construidos, caso aumento tonelaje en niveles de producción.....	52
Gráfico 5.12. Validación resultados de costos, caso aumento tonelaje en niveles de producción. .....	52
Gráfico 5.13. Validación resultados metros construidos, caso aumento niveles de producción. .	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Comparación entre modelo mina cielo abierto y los cambios para llevarlo a mina subterránea.....	24
Tabla 4.2. Inputs a ingresar en la ejecución del modelo.....	28
Tabla 5.1. Parámetros de entrada para validación y caso de estudio.....	32
Tabla 5.2. Comparación de valores en validación de cálculos del modelo.....	32
Tabla 5.3. Parámetros resolución.....	33
Tabla 5.4. Parámetros caso base validación inputs.....	33
Tabla 5.5. Resultados validación frontera.....	35
Tabla 5.6. Resultados validación pendiente.....	38
Tabla 5.7. Resultados validación sentido.....	39
Tabla 5.8. Resultados validación punto de inicio.....	42
Tabla 5.9. Valores de input costo de construcción rampa.....	43
Tabla 5.10. Resultados validación costo de construcción rampa.....	44
Tabla 5.11. Valores de input costo de construcción cruzado.....	45
Tabla 5.12. Resultados validación costo de construcción cruzados.....	46
Tabla 5.13. Valores de input costo de acarreo 0% a 5% de pendiente.....	47
Tabla 5.14. Resultados validación costo de acarreo 0% a 5% de pendiente.....	48
Tabla 5.15. Valores de input costo de acarreo 5% a 10% de pendiente.....	48
Tabla 5.16. Resultados validación costo de acarreo 5% a 10% de pendiente.....	49
Tabla 5.17. Resultados validación aumento tonelaje por nivel de producción.....	51
Tabla 5.18. Tonelaje de niveles al variar cantidad de niveles de producción.....	53
Tabla 5.19. Resultados validación aumento niveles de producción.....	54
Tabla 5.20. Observaciones en la validación de inputs del modelo.....	55
Tabla 5.21. Resultados validación cambio de forma guía de rampa.....	56
Tabla 6.1. Tonelaje de los pivotes zona Y este.....	61
Tabla 6.2. Resultados réplica zona Y este.....	62

Tabla 6.3. Tonelaje de los pivotes zona Y oeste inferior.....	62
Tabla 6.4. Resultados réplica zona Y oeste inferior. ....	63
Tabla 6.5. Tonelaje de los niveles zona Y oeste superior.....	64
Tabla 6.6. Resultados réplica zona Y oeste superior. ....	65
Tabla 6.7. Resultados de rampas zona Y este.....	67
Tabla 6.8. Resultados de rampas zona Y oeste inferior.....	70
Tabla 6.9. Resultado de rampa zona Y oeste superior.....	71
Tabla 6.10. Resultados rampa zona Y este con pendiente 10%.....	74
Tabla 6.11. Resultados rampa zona Y oeste inferior con pendiente 10%.....	76
Tabla 6.12. Resultados rampa zona Y oeste superior con pendiente 10%. ....	78
Tabla 10.1. Resultados variación de frontera.....	88
Tabla 10.2. Resultados variación pendiente. ....	88
Tabla 10.3. Resultados variación sentido. ....	89
Tabla 10.4. Resultados variación punto de inicio.....	89
Tabla 10.5. Resultados variación costo desarrollo rampa.....	90
Tabla 10.6. Resultados variación costo desarrollo rampa.....	90
Tabla 10.7. Resultados variación costo acarreo 0% a 5% de pendiente.....	91
Tabla 10.8. Resultados variación costo acarreo 5% a 10% de pendiente.....	91
Tabla 10.9. Resultados variación tonelaje por nivel de producción.....	92
Tabla 10.10. Resultados variación de cantidad de niveles de producción.....	92