

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. MODELO PROPUESTO	2
1.2. ALCANCES	4
1.3. OBJETIVO GENERAL	4
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
2.1. MINERÍA SUBTERRÁNEA SELECTIVA: SUBLEVEL STOPING	5
2.2. ALGORITMOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE CASERONES	7
2.3. MODELOS Y HERRAMIENTAS DE OPTIMIZACIÓN	12
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
<b>4. ALGORITMO D.S.S. SANDANAYAKE</b>	<b>14</b>
4.1. OBTENCIÓN LAYOUT ÓPTIMO CASERONES	14
4.1.1. <i>Generación de caserones-Modelo Python</i>	14
4.1.2. <i>Generación niveles- Sandanayake (2014)</i>	15
4.1.3. <i>Obtención familia set de caserones - Modelo Java</i>	17
<b>5. MODELO OPTIMIZACIÓN LINEAL</b>	<b>19</b>
5.1. MODELO GENERACIÓN ENVOLVENTE ECONÓMICA DE CASERONES	19
5.1.1. <i>Sets -Modelo generación envolvente económica</i>	19
5.1.2. <i>Variable de decisión y parámetros de entrada</i>	20
5.1.3. <i>Función objetivo</i>	20
5.1.4. <i>Restricciones</i>	20
5.2. MODELO LINEAL PARA COMPARACIÓN CON ALGORITMO SANDANAYAKE	22
5.3. CASOS DE ESTUDIO	23
<b>6. RESULTADOS OPTIMIZACIÓN</b>	<b>26</b>
6.1. ALGORITMO SANDANAYAKE VS. MODELO LINEAL CON NIVELES	26
6.1.1. <i>Resultados optimización</i>	26
6.1.2. <i>Tiempos optimización</i>	41
6.2. MODELO LINEAL SIN NIVELES – CASO GENERAL	47
<b>7. ANÁLISIS</b>	<b>57</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>62</b>
<b>10. ANEXOS</b>	<b>64</b>
10.1. ANEXO A: CÓDIGO PYTHON	64
10.2. ANEXO B: CÓDIGO JAVA - GENERACIÓN FAMILIA DE SETS CASERONES	66
10.3. ANEXO C: CÓDIGO PYTHON - PROCESAMIENTO DE DATOS OPTIMIZACIÓN	69
10.4. ANEXO D: PARÁMETROS ECONÓMICOS – CASOS ESTUDIO	71
10.5. ANEXO E: MODELOS DE BLOQUES – CASOS ESTUDIO	72
10.6. ANEXO F: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES	73
10.7. ANEXO G: GAP MODELOS HEURÍSTICOS Y MODELO LINEAL CON NIVELES PREDEFINIDOS	74
10.8. ANEXO H: ITERACIONES INCURRIDAS ALGORITMO SANDANAYAKE	76
10.9. ANEXO I: TIEMPOS OPTIMIZACIÓN ALGORITMO SANDANAYAKE	76

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN ALGORITMOS DISEÑO Y SELECCIÓN CASERONES .....	11
TABLA 2: CASOS DE ESTUDIO – NIVELES PREDEFINIDOS .....	23
TABLA 3: CASO ESTUDIO GENERAL – SIN NIVELES PREDEFINIDOS .....	24
TABLA 4: ESTADÍSTICAS BÁSICAS TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – NIVELES PREDEFINIDOS .....	25
TABLA 5: TIEMPO GENERACIÓN CASERONES FACTIBLES – CASO ESTUDIO GENERAL.....	25
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS COMPUTADORES – CORRIDAS CASOS ESTUDIO .....	26
TABLA 7: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR CTK.....	29
TABLA 8: TABLA COMPARATIVA TIEMPOS EJECUCIÓN Y GAP - SANDANAYAKE .....	45
TABLA 9: TIEMPO EJECUCIÓN – MODELO LINEAL C/NIVELES.....	46
TABLA 10: ESTADÍSTICAS BÁSICAS TIEMPOS EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE E IP C/NIVELES .....	46
TABLA 11: ESTADÍSTICAS BÁSICAS TIEMPOS PRE-PROCESAMIENTO – IP C/NIVELES.....	47
TABLA 12: RESULTADOS CASO ESTUDIO GENERAL .....	47
TABLA 13: PARÁMETROS ECONÓMICOS – CASOS ESTUDIO .....	71
TABLA 14: DIMENSIONES MODELOS DE BLOQUES – CASOS ESTUDIO .....	72
TABLA 15: MODELOS DE BLOQUES – CASOS ESTUDIO .....	72
TABLA 16: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – CASO ESTUDIO 1 .....	73
TABLA 17: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – CASO ESTUDIO 2 .....	73
TABLA 18: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – CASO ESTUDIO 3 .....	73
TABLA 19: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – CASO ESTUDIO 4 .....	73
TABLA 20: TIEMPOS GENERACIÓN CASERONES – CASO ESTUDIO 5 .....	73
TABLA 21: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR MODELO – CASO 1.....	74
TABLA 22: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR MODELO – CASO 2.....	74
TABLA 23: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR MODELO – CASO 3.....	74
TABLA 24: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR MODELO – CASO 4.....	75
TABLA 25: ESTADÍSTICAS BÁSICAS GAP POR MODELO – CASO 5.....	75
TABLA 26: ITERACIONES ALGORITMO SANDANAYAKE – CTK 10.....	76
TABLA 27: ITERACIONES ALGORITMO SANDANAYAKE – CTK 100.....	76
TABLA 28: ITERACIONES ALGORITMO SANDANAYAKE – CTK 1000.....	76
TABLA 29: TIEMPO EJECUCIÓN SANDANAYAKE – CASO 1 .....	76
TABLA 30: TIEMPO EJECUCIÓN SANDANAYAKE – CASO 2 .....	77
TABLA 31: TIEMPO EJECUCIÓN SANDANAYAKE – CASO 3 .....	77
TABLA 32: TIEMPO EJECUCIÓN SANDANAYAKE – CASO 4 .....	77
TABLA 33: TIEMPO EJECUCIÓN SANDANAYAKE – CASO 5 .....	78

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: GENERACIÓN CASERONES FACTIBLES PARA LA OPTIMIZACIÓN .....	3
ILUSTRACIÓN 2: VISTA 3D CASERÓN SUBLEVEL STOPING. (FUENTE: VILLAESCURSA, E., GEOTECHNICAL DESIGN FOR SUBLEVEL OPEN STOPING., CRC PRESS, TAYLOR & FRANCIS GROUP., PG. 6.,2014) ...	6
ILUSTRACIÓN 3: PERFIL EXPLOTACIÓN SUBLEVEL STOPING Y PILARES (FUENTE: VILLAESCURSA, E., GEOTECHNICAL DESIGN FOR SUBLEVEL OPEN STOPING., CRC PRESS, TAYLOR & FRANCIS GROUP.,PG. 55., 2014).....	6
ILUSTRACIÓN 4: METODOLOGÍA GENERAL ALGORITMO DE SANDANAYAKE (2014) .....	14
ILUSTRACIÓN 5: EJEMPLO DE LOS ARCHIVOS PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO DE CASERONES .....	15
ILUSTRACIÓN 6: GENERACIÓN CASERONES FACTIBLES .....	16
ILUSTRACIÓN 7: GENERACIÓN CASERONES FACTIBLES CON CROWN PILLAR .....	16
ILUSTRACIÓN 8: EJEMPLO CONFIGURACIONES PARA LA EXTRACCIÓN DE CASERONES EN MISMO NIVEL .....	21
ILUSTRACIÓN 9: ESQUEMA GENERAL MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EVALUADOS.....	23
ILUSTRACIÓN 10: ESQUEMA GENERAL CASOS ESTUDIO .....	24
ILUSTRACIÓN 11: COMPARACIÓN BENEFICIO MODELO SANDANAYAKE E IP CON NIVELES – 2,300 CAS .....	26
ILUSTRACIÓN 12: COMPARACIÓN BENEFICIO MODELO SANDANAYAKE E IP CON NIVELES – 3,900 CAS .....	27
ILUSTRACIÓN 13: COMPARACIÓN BENEFICIO MODELO SANDANAYAKE E IP CON NIVELES – 6,500 CAS .....	27
ILUSTRACIÓN 14: COMPARACIÓN BENEFICIO MODELO SANDANAYAKE E IP CON NIVELES – 8,500 CAS .....	28
ILUSTRACIÓN 15: COMPARACIÓN BENEFICIO MODELO SANDANAYAKE E IP CON NIVELES – 10,000 CAS .....	28
ILUSTRACIÓN 16: GAP PROMEDIO SOLUCIÓN SANDANAYAKE .....	30
ILUSTRACIÓN 17: GAP PORCENTUAL MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN MODELO IP – CASO 1 .....	31
ILUSTRACIÓN 18: GAP MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN MODELO IP – CASO 2.....	32
ILUSTRACIÓN 19: GAP MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN MODELO ENVOLVENTE – CASO 3 .....	32
ILUSTRACIÓN 20: GAP MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN MODELO ENVOLVENTE – CASO 4 .....	33
ILUSTRACIÓN 21: GAP MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN MODELO ENVOLVENTE – CASO 5 .....	34
ILUSTRACIÓN 22: CASERONES M6 CASO 1 MODELO LINEAL– 3D, PLANO YZ, PLANO XZ.....	35
ILUSTRACIÓN 23: CASERONES M6 CASO 1 MODELO LINEAL– PLANO XY: COTA 0, COTA 60.....	36
ILUSTRACIÓN 24: CASERONES M6 CASO 1 MODELO LINEAL– PLANO XY: COTA 120 .....	36
ILUSTRACIÓN 25: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=10 – 3D, PLANO YZ, PLANO XZ .....	37
ILUSTRACIÓN 26: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=10 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60, COTA 120.....	37
ILUSTRACIÓN 27: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=100 – 3D, PLANO YZ, PLANO XZ .....	38
ILUSTRACIÓN 28: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=100 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60.....	39
ILUSTRACIÓN 29: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=100 – PLANO XY: COTA 120.....	39
ILUSTRACIÓN 30: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=1000 – 3D, PLANO YZ, PLANO XZ .....	40
ILUSTRACIÓN 31: CASERONES M6 CASO 1 SANDANAYAKE CTK=1000 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60, COTA 120 .....	40
ILUSTRACIÓN 32: TIEMPO EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN DE CTK – CASO 1 .....	41
ILUSTRACIÓN 33: TIEMPO EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN DE CTK – CASO 2 .....	42
ILUSTRACIÓN 34: TIEMPO EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN DE CTK – CASO 3 .....	42
ILUSTRACIÓN 35: TIEMPO EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN DE CTK – CASO 4 .....	43
ILUSTRACIÓN 36: TIEMPO EJECUCIÓN MODELO SANDANAYAKE EN FUNCIÓN DE CTK – CASO 5 .....	44
ILUSTRACIÓN 37: GRÁFICO COMPARATIVO TIEMPO EJECUCIÓN Y GAP - SANDANAYAKE .....	45
ILUSTRACIÓN 38: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL SANDANAYAKE CTK=10 – 3D, PLANO XZ, PLANO YZ .....	49
ILUSTRACIÓN 39: CASERONES CASO ESTUDIO SANDANAYAKE CTK=10 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60, COTA 120 .....	50
ILUSTRACIÓN 40: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL SANDANAYAKE CTK=100 – 3D, PLANO XZ, PLANO YZ.....	51
ILUSTRACIÓN 41: CASERONES CASO ESTUDIO SANDANAYAKE CTK=100 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60 51	51
ILUSTRACIÓN 42: CASERONES CASO ESTUDIO SANDANAYAKE CTK=100 – PLANO XY: COTA120 .....	52
ILUSTRACIÓN 43: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL SANDANAYAKE CTK=1000 – 3D, PLANO XZ, PLANO YZ.....	52

ILUSTRACIÓN 44: CASERONES CASO ESTUDIO SANDANAYAKE CTK=1000 – PLANO XY: COTA 0, COTA 60, COTA 120 .....	53
ILUSTRACIÓN 45: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL MODELO LINEAL NIVELES – 3D.....	53
ILUSTRACIÓN 46: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL MODELO LINEAL NIVELES – PLANO XZ, PLANO YZ .....	54
ILUSTRACIÓN 47: CASERONES CASO ESTUDIO MODELO LINEAL NIVELES – PLANO XY: COTA 0, COTA 60, COTA 120 .....	54
ILUSTRACIÓN 48: CASERONES CASO ESTUDIO GENERAL MODELO LINEAL LIBRE – 3D, PLANO XZ, PLANO YZ .....	55
ILUSTRACIÓN 49: CASERONES CASO ESTUDIO MODELO LINEAL NIVELES – PLANO XY: COTA 30, COTA 90, COTA 150 .....	56
ILUSTRACIÓN 50: ESQUEMA GENERAL GENERACIÓN CASERONES.....	65
ILUSTRACIÓN 51: DIAGRAMA DE FLUJO FAMILIA SETS CASERONES, SANDANAYAKE 2014.....	67

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: UTILIDAD BLOQUE.....	2
ECUACIÓN 2: ESTRUCTURA MATEMÁTICA PROGRAMACIÓN BINARIA .....	12
ECUACIÓN 3: RESTRICCIÓN ANCHO PILAR ENTRE CASERONES .....	20
ECUACIÓN 4: VARIABLE DE DECISIÓN- GENERACIÓN ENVOLVENTE ÓPTIMA .....	20
ECUACIÓN 5: FUNCIÓN OBJETIVO- GENERACIÓN ENVOLVENTE ÓPTIMA .....	20
ECUACIÓN 6: RESTRICCIÓN PRODUCCIÓN CASERONES TRASLAPADOS- MODELO ENVOLVENTE ECONÓMICA .....	21
ECUACIÓN 7: RESTRICCIÓN PRODUCCIÓN CASERONES DISTINTO NIVEL- MODELO ENVOLVENTE ECONÓMICA .....	21
ECUACIÓN 8: RESTRICCIÓN PRODUCCIÓN CASERONES SIN PILAR- MODELO ENVOLVENTE ECONÓMICA.....	21
ECUACIÓN 9: RESTRICCIÓN VARIABLES BINARIAS- MODELO ENVOLVENTE ECONÓMICA.....	21
ECUACIÓN 10: ESTIMACIÓN GAP .....	29
ECUACIÓN 11: ECUACIONES TRASLAPE CASERONES.....	68
ECUACIÓN 12: VECINDAD PARA BÚSQUEDA DE SET DE NIVELES DE EXTRACCIÓN.....	69