

Índice General

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Metodología.....	3
Capítulo 2: Marco Teórico	6
2.1. Problema Estocástico.....	7
2.1.1. Problema estocástico de dos etapas	7
2.1.2. Problema estocástico multiperiodo	8
2.2. Modelo Estocástico Compacto y Extendido	9
2.2.1. Formulación explícita o extendida.....	10
2.2.2. Formulación implícita o compacta.....	11
2.3. Progressive Hedging	11
2.3.1. Teoría de Progressive Hedging	12
2.3.2. Pseudocódigo de PH	13
Capítulo 3: Descripción y Modelación del Problema Minero	16
3.1. Operaciones en una Mina a Cielo Abierto	16
3.1.1. Extracción de mineral	16
3.1.2. Procesamiento del mineral	18
3.2. Optimización del Problema Determinístico.....	19
3.2.1. Función Objetivo	19
3.2.2. Variables.....	20
3.2.3. Restricciones	20

3.3. Caso de Estudio	21
3.3.1. Descripción de la instancia	21
3.3.2. Configuración de las instancias	22
3.3.3. Parámetros	24
3.3.4. Inversiones.....	25
3.3.5. Periodos.....	25
Capítulo 4: Resolución del Problema Estocástico	26
4.1. Definición del Árbol de Escenarios	26
4.1.1. Árboles con precio de largo plazo de 300 USc\$/libra	27
4.1.2. Árboles con precio de largo plazo de 250 USc\$/libra	27
4.1.3. Árboles con precio de largo plazo de 200 USc\$/libra	28
4.2. Iteraciones PH.....	28
4.3. Fijación de variables.....	29
4.4. Resolución del Modelo Estocástico Compacto.....	31
4.5. Consideraciones adicionales	32
4.5.1. Continuidad del plan minero	32
4.5.2. Flexibilidad en la extracción de fases	32
Capítulo 5: Resultados	34
5.1. Tamaño del Problema	34
5.2. Resultados	35
5.2.1. Resultados de instancias base	35
5.2.2. Resultados de instancias con opción de inversión.....	36
5.3. Análisis de los Resultados.....	38
5.3.1. Análisis de soluciones obtenidas	38
5.3.2. Sensibilidad al precio de largo plazo.....	43
5.3.3. Sensibilidad al número de escenarios	44
5.3.4. Impacto de la fijación de variables	46
5.3.5. Impacto de resolución por separación del árbol.....	47

Capítulo 6: Conclusiones	48
6.1. Resumen y Principales Resultados	48
6.2. Trabajo Futuro	49
Bibliografía	50
Anexo A: Detalle de Soluciones Obtenidas	52
A.1. Árbol de 32 escenarios, precio promedio de largo plazo de 300 USc\$/lb	52
A.1.1. Árbol de escenarios	52
A.1.2. Series de Precio.....	53
A.1.3. Flujos de Caja	54
A.1.4. Movimiento de Materiales	55
A.2. Árbol de 32 escenarios, Precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb	58
A.2.1. Árbol de escenarios	58
A.2.2. Series de Precio.....	59
A.2.3. Flujos de Caja	60
A.2.4. Movimiento de Materiales	61
A.3. Árbol de 32 escenarios, Precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb	64
A.3.1. Árbol de escenarios	64
A.3.2. Series de Precio.....	65
A.3.3. Flujos de Caja	66
A.3.4. Movimiento de Materiales	67
A.4. Árbol de 32 escenarios, Precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb. Con opción de inversión.....	70
A.4.1. Flujos de Caja	70
A.4.2. Movimiento de Materiales	71

Índice de Figuras

Figura 1.1: Precio Real del Cobre refinado LME.....	2
Figura 1.2: Ejemplo de árbol de escenarios, compuesto por 4 periodos y 5 escenarios..	4
Figura 2.1: Ejemplo de árbol de escenarios, compuesto por 4 periodos y 5 escenarios.	10
Figura 2.2: Formulaciones para un modelo estocástico con un árbol de escenarios de 4 periodos y 5 escenarios.	11
Figura 3.1: Ejemplo de fases de expansión de una mina a cielo abierto.....	17
Figura 3.2: Representación de los bancos de una fase	17
Figura 3.3: Esquema de operación minera en una mina de rajo abierto.	18
Figura 3.4: Ubicación de los yacimientos del Cluster Toki.	21
Figura 3.5: Esquema de los procesos utilizados para la instancia base.	23
Figura 3.6: Esquema de los procesos utilizados para la instancia con opción de inversión.....	24
Figura 4.1: Árboles de escenarios de 16 y 32 escenarios, con un precio promedio de largo plazo de 300 US\$/lb	27
Figura 4.2: Árboles de escenarios de 16 y 32 escenarios, con un precio promedio de largo plazo de 250 US\$/lb	27

Figura 4.3: Árboles de escenarios de 16 y 32 escenarios, con un precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb	28
Figura 4.4: Serie de Precios promedio para cada árbol utilizado	28
Figura 4.5: Ejemplo de solución obtenida luego de realizar las iteraciones PH	29
Figura 4.6: Ejemplo de solución obtenida luego de realizar las iteraciones PH, donde se puede utilizar la Estrategia 2.	30
Figura 4.7: Separación del árbol de escenarios.	31
Figura 5.1: Escenarios en los que se realizó inversión. Instancia usando un árbol de 16 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	37
Figura 5.2: Escenarios en los que se realizó inversión. Instancia usando un árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	38
Figura 5.3: Series de precio de los escenarios 1 y 2 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	39
Figura 5.4: Series de precio de los escenarios 4 y 5 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	40
Figura 5.5: Series de precio de los escenarios 14 y 16 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	41
Figura 5.6: Series de precio inferiores del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 200 USc\$/lb.	42
Figura 5.7: Comparación del árbol de escenarios con Precio LP 300 USc\$/lb frente al Break even price	43
Figura 5.8: Comparación del árbol de escenarios con Precio LP 200 USc/lb frente al Break even price	44
Figura 5.9: Comparación de árboles de escenarios que tienen en común la misma serie de precio promedio.....	45

Figura A.1: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 300 USc\$/lb52

Figura A.2: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb58

Figura A.3: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb64

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Indicadores económicos del proyecto Quetena, evaluado a diferentes precios del cobre.....	2
Tabla 3.1: Agrupación de periodos.....	25
Tabla 5.1: Tamaño de los problemas resueltos.....	34
Tabla 5.2: Resultados económicos de las instancias base.	36
Tabla 5.3: Tiempos de resolución de las instancias base.	36
Tabla 5.4: Comparación de resultados económicos entre instancias con y sin opción de inversión. Precio de Largo plazo: 250 USc\$/lb.....	37
Tabla 5.5: Comparación de tiempos de resolución entre instancias con y sin opción de inversión.....	37
Tabla 5.6: Mov. de material en miles de toneladas por día (ktpd) del plan minero estocástico, para los escenarios 1 y 2 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	39
Tabla 5.7: Mov. de material en miles de toneladas por día (ktpd) del plan minero estocástico, para los escenarios 4 y 5 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	40
Tabla 5.8: Mov. de material en miles de toneladas por día (ktpd) del plan minero estocástico, para los escenarios 14 y 16 del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	41

Tabla 5.9: Flujo de caja para los escenarios inferiores del árbol con 16 escenarios y precio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	42
Tabla 5.10: Comparación de flexibilidad en árboles de escenarios que tienen en común la misma serie de precio promedio.	45
Tabla 5.11: Impacto en tiempo de resolución y calidad de la solución al utilizar las diferentes estrategias de fijación de variables.....	46
Tabla 5.12: Impacto en tiempo de resolución y calidad de la solución al utilizar la estrategia de resolución por separación del árbol de escenarios.....	47
Tabla A.1: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 300 USc\$/lb.	53
Tabla A.2: Flujos de caja obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 300 USc\$/lb.	54
Tabla A.3: Movimiento de Materiales obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 300 USc\$/lb.....	55
Tabla A.4: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	59
Tabla A.5: Flujos de caja obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.	60
Tabla A.6: Movimiento de Materiales obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....	61
Tabla A.7: Series de precio para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb.	65
Tabla A.8: Flujos de caja obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb.	66

Tabla A.9: Movimiento de Materiales obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 200 USc\$/lb.....67

Tabla A.10: Flujos de caja obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb, con posibilidad de invertir en aumento de capacidad de proceso.70

Tabla A.11: Movimiento de Materiales obtenidos como solución del modelo estocástico para el árbol de 32 escenarios con precio promedio de largo plazo de 250 USc\$/lb.....71