

Tabla de Contenido

Resumen ejecutivo.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iii
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Solución propuesta.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 Alcances.....	2
1.6 Metodologías y herramientas utilizadas.....	3
1.7 Resultados esperados.....	4
1.8 Organización del documento.....	4
1.8.1 Antecedentes teóricos.....	4
1.8.2 Estudio de mercado.....	4
1.8.3 Estudio económico.....	5
1.8.4 Estudio técnico.....	5
1.8.5 Evaluación económica y de riesgo.....	5
1.8.6 Conclusiones.....	5
2. Antecedentes teóricos.....	6
2.1 Niveles de ingeniería.....	6
2.2 Planificación minera.....	7
2.2.1 Planificación de largo plazo.....	8
2.2.2 Planificación de mediano plazo.....	8
2.2.3 Planificación de corto plazo.....	8
2.3 Minería cielo abierto.....	8
2.3.1 Métodos de explotación.....	10
2.3.2 Cálculo del pit final.....	11
2.3.3 Diseño minero.....	13
2.3.4 Diseño de fases.....	13
2.3.5 El programa de producción.....	13

2.3.6	Operaciones unitarias	14
2.3.7	Evaluación económica.....	14
2.3.8	Análisis de riesgo	15
2.4	Econometría	16
2.5	Descripción de la Cal	17
2.5.1	Roca caliza.....	17
2.5.2	La Cal	17
2.5.3	Ciclo de la cal	17
2.5.4	Usos de la Cal.....	18
2.5.5	Proceso productivo	18
3.	Estudio de mercado	21
3.1	Producción nacional de caliza.....	21
3.2	Importación de cal	21
3.2.1	Sibelco	22
3.2.2	Cefas	22
3.2.3	Compañía Minera del Pacífico	23
3.3	Producción de cal.....	23
3.3.1	Producción nacional	23
3.3.2	Producción de Argentina	24
3.4	Estimaciones del mercado de la cal	25
3.5	Benchmarking de otras faenas mineras	26
3.6	Descripción del yacimiento sintético	27
4.	Estudio económico	29
4.1	Precio de la cal.....	29
4.2	Estimación de costos.....	31
4.2.1	Obtención y limpieza de datos.....	31
4.2.2	Estadística descriptiva	31
4.2.3	Test de raíz unitaria	33
4.2.4	Correlograma	34
4.2.5	Modelamiento de las series temporales	36
4.3	Precio del dólar	43
5.	Estudio técnico	44
5.1	Parámetros técnicos	44
5.1.1	Talud.....	44

5.1.2	Caminos	45
5.1.3	Ancho frente de extracción.....	46
5.2	Explotación óptima	47
5.3	Diseño operativo	48
5.4	Secuencia de explotación.....	50
5.5	Planificación minera	52
5.6	Diseño de botadero	54
5.7	Operaciones unitarias.....	55
5.7.1	Perforación.....	55
5.7.2	Tronadura.....	58
5.7.3	Fragmentación	59
5.7.4	Carguío	63
5.7.5	Transporte.....	64
5.7.6	Equipos auxiliares	66
5.8	Operaciones de la planta de procesamiento.....	67
5.8.1	Chancador.....	67
5.8.2	Circuito de conminución	69
5.8.3	Harnero	71
5.8.4	Correa transportadora	72
5.8.5	Elevador de capacho.....	77
5.8.6	Horno de calcinación	78
5.9	Plan de producción.....	78
5.9.1	Stocks	79
5.9.2	Producción de cal.....	80
6.	Evaluación económica y de riesgo	81
6.1	Capex	81
6.1.1	Resumen del Capex	82
6.2	Opex.....	83
6.2.1	Energía eléctrica	83
6.2.2	Agua	83
6.2.3	Combustible.....	84
6.2.4	Personal	84
6.2.5	Mantenimiento.....	85
6.2.6	Insumos.....	86

6.2.7	Resumen del Opex.....	86
6.3	Evaluación económica.....	88
6.3.1	Consideraciones iniciales.....	88
6.3.2	Escenario base.....	89
6.3.3	Escenario optimista.....	90
6.3.4	Escenario pesimista.....	92
6.4	Evaluación de riesgo.....	94
6.4.1	Análisis de sensibilidad.....	94
6.4.2	Simulación.....	100
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	102
7.1	Conclusiones.....	102
7.2	Recomendaciones.....	103
8.	Bibliografía.....	104
	Anexo A: Chancador.....	106
	Anexo B: Harnero.....	107
	Anexo C: Cinta transportadora.....	111
	Anexo D: <i>Pre-stripping</i>	113
	Anexo E: Costo mano de obra.....	115
	Anexo F: Memoria de cálculo insumos.....	118
	Anexo G: Calendarios.....	119
	Anexo H: Flujos de caja.....	121
	Anexos I: Ajuste de datos.....	123

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Descripción de método de evaluación.....	6
Tabla 2.2: Definición de clases por los estudios de Ingeniería	7
Tabla 2.3: Distribución porcentual de costos, Operaciones Mina.....	14
Tabla 2.4: Usos de la cal en minería.....	19
Tabla 3.1: Producción de caliza por regiones (ktpa), años 2007-2016. Fuente: Sernageomin	21
Tabla 3.2: Cubicación del yacimiento	28
Tabla 4.1: Test de raíz unitaria sobre las series de datos.....	33
Tabla 4.2: Resultados del test de raíz unitaria para el delta Diésel (USD/Lt).....	34
Tabla 4.3: Resultados del test de raíz unitaria para el delta Fuel N°6 (USD/Ton).....	35
Tabla 4.4: Resultados del test de raíz unitaria para el delta energía eléctrica (CLP/kWh) ..	36
Tabla 4.5: Parámetros del modelo para los deltas del precio del Diésel (USD/Lt).....	38
Tabla 4.6: Parámetros del modelo de los deltas del Fuel N°6 (USD/Ton).....	40
Tabla 4.7: Parámetros del modelo de los deltas del precio de la energía eléctrica (CLP/kWh)	42
Tabla 5.1: Parámetros de la optimización	47
Tabla 5.2: Cubicación de la explotación óptima	48
Tabla 5.3: Cubicación de reservas operativas	50
Tabla 5.4: Cubicación de las fases.....	51
Tabla 5.5: Datos de potencia relativa	57
Tabla 5.6: Datos de potencia rompedora.....	57
Tabla 5.7: Ponderadores asociados a las propiedades de la caliza.	60
Tabla 5.8: Tamaño de fragmentos medios para cada malla	61
Tabla 5.9: Parámetros de Rossin – Rammler según tipo de malla	62
Tabla 5.10: P ₈₀ para cada una de las mallas	63
Tabla 5.11: Equipos auxiliares	67
Tabla 5.12: Parámetros para estimar potencia del chancador	68
Tabla 5.13: Flujo másico sobre el harnero de malla 100 mm.....	71
Tabla 5.14: Condiciones iniciales del sistema.....	71
Tabla 5.15: Factores de la capacidad específica de cribado	72
Tabla 5.16: Condiciones iniciales de la correa transportadora.....	72
Tabla 5.17: Parámetros de la cinta.....	73
Tabla 5.18: Parámetros de la tensión efectiva	74
Tabla 5.19: Parámetros de los polines	75
Tabla 5.20: Pesos unitarios de los polines.....	75
Tabla 5.21: Parámetros para el cálculo de la potencia de la cinta transportadora	76
Tabla 5.22: Condiciones iniciales del elevador de capacho	77
Tabla 5.23: Parámetros para el cálculo de la potencia	78
Tabla 5.24: Cuadro comparativo de hornos de calcinación.....	78
Tabla 5.25: Parámetros técnicos del horno vertical.....	78
Tabla 5.26: Capacidades de stock diseñado	79
Tabla 5.27: Parámetros de diseño de los stocks	79
Tabla 5.28: Parámetros de la producción de cal.....	80
Tabla 6.1: Capex de equipos mina	81
Tabla 6.2: Capex en obras civiles.....	82

Tabla 6.3: Capex en la planta de procesamiento	82
Tabla 6.4: Capex total según categoría.....	83
Tabla 6.5: Costo operativo de la energía eléctrica (MUSD)	83
Tabla 6.6: Costo operativo del agua (MUSD).....	83
Tabla 6.7: Costo operativo del consumo de combustible.....	84
Tabla 6.8: Costo de los implementos de protección personal	84
Tabla 6.9: Tabla resumen de sueldos.....	85
Tabla 6.10: Costos de los insumos	86
Tabla 6.11: Características de los activos.....	89
Tabla 6.12: Parámetros del caso base.....	89
Tabla 6.13: Indicadores de rentabilidad del caso base	90
Tabla 6.14: Parámetros del caso optimista.....	91
Tabla 6.15: Indicadores de rentabilidad para el escenario optimista.....	91
Tabla 6.16: Parámetros del escenario pesimista.....	92
Tabla 6.17: Indicadores de rentabilidad para el escenario pesimista	92
Tabla 6.18: Comparación de los escenarios	93
Tabla 6.19: Análisis de sensibilidad caso 1: Energía eléctrica frente a precio de la cal	95
Tabla 6.20: Análisis de sensibilidad caso 2: Tipo de cambio frente a precio de la cal	96
Tabla 6.21: Análisis de sensibilidad caso 3: Precio del combustible Diésel frente a precio de la cal.....	97
Tabla 6.22: Análisis de sensibilidad caso 4: Precio del combustible Fuel N°6 frente a precio de la cal.....	98
Tabla 6.23: Análisis de sensibilidad caso 5: Tasa de descuento frente a precio de la cal ...	99
Tabla 6.24: Distribución de las variables de impacto.....	100
Tabla B.1: Factor D según la posición del piso.....	109
Tabla B.2: Factor E de separación del material según granulometría esperada	109
Tabla B.3: Factor F de la densidad del material	109
Tabla B.4: Factor H del tipo de malla	109
Tabla B.5: Factor I de la forma de la partícula.....	110
Tabla B.6: Factor J de la eficiencia de la separación.....	110
Tabla B.7: Factor K según el tipo de harnero requerido	110
Tabla B.8: Factor L según la humedad.....	110
Tabla C.1: Ángulo de reposo y sobrecarga para distintos materiales.....	111
Tabla C.2: Velocidad máxima de la cinta transportadora	111
Tabla C.3: Peso de la correa	112
Tabla C.4: Carga sobre los polines.....	112
Tabla D.1: Parámetros técnicos y económicos bulldozers Caterpillar	113
Tabla D.2: Comparación entre compra y arriendo	113
Tabla D.3: Estrategia de pre-stripping.....	114
Tabla E.1: Sueldos del personal del departamento de gerencia mina	115
Tabla E.2: Sueldo del departamento de planificación mina	115
Tabla E.3: Sueldo del departamento de operaciones mina.....	116
Tabla E.4: Sueldos de departamento de operaciones mina	116
Tabla E.5: Sueldo de personal departamento de operaciones planta.....	117
Tabla F.1: Memoria de cálculo de insumos de perforación	118
Tabla F.2: Memoria de cálculo del costo de tronadura	118
Tabla G.1: Calendario de inversión.....	119

Tabla G.2: Calendario de depreciación	119
Tabla G.3: Calendario de valor libro	120
Tabla G.4: Calendario de ventas de activos	120
Tabla H.1: Flujo de caja en el caso base.....	121
Tabla H.2: Flujo de caja bajo un escenario optimista.....	121
Tabla H.3: Flujo de caja bajo un escenario pesimista	122

Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema de horizontes de planificación.....	7
Figura 2.2: Proceso de planificación de minería superficial.	9
Figura 2.3: Extracción por banco único.....	10
Figura 2.4: Método de extracción banco escalonados.....	11
Figura 2.5: Algoritmo de L&G usando grafos.	13
Figura 2.6: Gráfico tipo tornado.....	15
Figura 2.7: Ingresos netos-Histograma/ Probabilidad acumulada obtenido de 5000 realizaciones	16
Figura 2.8: Proceso productivo de la cal. Fuente: La cal (Saavedra, 2013).	20
Figura 3.1: Evolución de las importaciones de cal viva. Fuente: Cámara del comercio exterior	22
Figura 3.2: Principales empresas importadoras de Cal Viva 2005-2015. Fuente: Cochilco	23
Figura 3.3: Principales plantas productoras de cal en Chile. Fuente: Cochilco	24
Figura 3.4: Principales provincias productoras de cal en Argentina. Fuente: Cochilco.....	24
Figura 3.5: Gráfico comparativo de la producción de cal en Chile y Argentina. Fuente: Ministerio de producción provincia de San Juan y Sernageomin.	25
Figura 3.6: Balance entre la oferta y demanda de la cal en minería. Fuente: Cochilco	26
Figura 3.7: Perfil N-S E1200 del yacimiento sintético.....	27
Figura 3.8: Vista en planta del nivel 20 del yacimiento sintético.....	28
Figura 4.1: Valor CIF unitario para la cal periodo del 2005 al 2016. Fuente Cochilco.	29
Figura 4.2: Proyección del precio de la cal (USD/Ton)	30
Figura 4.3: Gráfico de los residuos de la regresión lineal	30
Figura 4.4: Histograma para los precios del Diésel (USD/Lt)	32
Figura 4.5: Histograma para los precios del FUEL N°6 (USD/Ton)	32
Figura 4.6: Histograma del precio de la energía eléctrica (CLP/kWh)	33
Figura 4.7: Correlograma para el delta precio del Diésel (USD/Lt)	34
Figura 4.8: Correlograma para el delta precio del FUEL N°6 (USD/Ton)	35
Figura 4.9: Correlograma para el delta precio de la energía eléctrica (CLP/kWh)	36
Figura 4.10: Serie temporal de los deltas del precio del Diésel (USD/Lt)	37
Figura 4.11: Escenarios de precios para el Diésel (USD/Lt).....	38
Figura 4.12: Serie temporal de los deltas para el FUEL N°6 (USD/Ton).....	39
Figura 4.13: Escenarios de precios para el FUEL N°6 (USD/Ton)	40
Figura 4.14: Serie temporal de los deltas para de la energía eléctrica (CLP/kWh).....	41
Figura 4.15: Escenarios de precios para el precio de la energía eléctrica (CLP/kWh)	42
Figura 4.16: Valor del tipo de cambio sectorial para operar en equilibrio de largo plazo. Fuente Cámara del Comercio de Santiago (2018).....	43
Figura 5.1: Parámetros técnicos del talud. Elaboración propia	44
Figura 5.2: Ancho rampas y caminos interiores. Fuente: Manual de diseño, construcción y mantención de caminos mineros.....	45
Figura 5.3: Ancho en caminos principales. Fuente: Manual de diseño, construcción y mantención de caminos mineros.....	46
Figura 5.4: Ancho frente de extracción Fuente: Manual de diseño, construcción y mantención de caminos mineros	46
Figura 5.5: Pit final con Economic Planner.....	48
Figura 5.6: Vista en planta del diseño operativo	49

Figura 5.7: Vista en sección norte del yacimiento.....	49
Figura 5.8: Vista en planta de la fase 1 culminada.....	50
Figura 5.9: Vista en planta de la fase 2 culminada.....	51
Figura 5.10: Plan de producción mina.....	52
Figura 5.11: Plan de alimentación planta.....	53
Figura 5.12: Plan de movimiento de estéril.....	53
Figura 5.13: Vista en planta del botadero.....	54
Figura 5.14: Vista N-S E1200 del botadero.....	55
Figura 5.15: Comparación de equipos de perforación.....	58
Figura 5.16: Esquema de un pozo cargado con explosivo. Fuente: Mina El Fierro.....	59
Figura 5.17: Curva granulométrica de Kuz Ram.....	62
Figura 5.18: Utilización equipo de carguío.....	64
Figura 5.19: Perfil de transporte para el año 2024.....	64
Figura 5.20: Parámetros del camión de 10 m ³	65
Figura 5.21: Parámetro del camión de 15 m ³	66
Figura 5.22: Parámetros del camión de 20 m ³	66
Figura 5.23: Simulación de escenario de conminución uno.....	69
Figura 5.24: Simulación de escenario de conminución dos.....	70
Figura 5.25: Simulación de escenario de conminución tres.....	70
Figura 5.26: Criterio para determinar el ancho de la correa.....	73
Figura 5.27: Producción de cal viva (ktpa).....	80
Figura 6.1: Distribución porcentual del Capex.....	82
Figura 6.2: Distribución de los costos del personal por departamento.....	85
Figura 6.3: Distribución de los costos de mantenimiento.....	86
Figura 6.4: Distribución del costo operativo mina (%).....	87
Figura 6.5: Distribución del costo operativo planta.....	87
Figura 6.6: Distribución del costo operativo global (%).....	88
Figura 6.7: Evolución del VAN por periodo para el escenario base.....	90
Figura 6.8: Evolución del VAN por periodo para el escenario optimista.....	91
Figura 6.9: Evolución del VAN por periodo para el escenario pesimista.....	93
Figura 6.10: Evolución comparativa del VAN para cada escenario.....	94
Figura 6.11: Gráfico de análisis de sensibilidad del precio de la cal frente al precio de la energía eléctrica.....	95
Figura 6.12: Gráfico de análisis de sensibilidad del precio de la cal frente a la tasa de cambio.....	96
Figura 6.13: Gráfico de análisis de sensibilidad del precio de la cal frente al precio del Fuel N°6.....	98
Figura 6.14: Gráfico de análisis de sensibilidad del precio de la cal frente a la tasa de descuento.....	99
Figura 6.15: Distribución del VAN (MMUSD).....	100
Figura 6.16: Distribución en percentiles del VAN (MMUSD).....	101
Figura A.1: Tabla de especificaciones técnicas de los chancadores de mandíbula.....	106
Figura B.1: Factor a de capacidad específica de producción de cribado.....	107
Figura B.2: Factor B del material retenido.....	108
Figura B.3: Factor C de mitad de la abertura.....	108
Figura D.1: Comparación de opción de compra y arriendo.....	114
Figura I.1: Ajuste de la distribución de datos para el costo eléctrico (CLP/kWh).....	123

Figura I.2: Parámetros de la distribución del costo eléctrico (CLP/kWh).....	123
Figura I.3: Ajuste de distribución para el costo del Fuel N°6 (USD/Ton).....	124
Figura I.4: Parámetros de la distribución del costo del Fuel N°6 (USD/Ton)	124
Figura I.5: Ajuste de distribución para el costo del Diésel (USD/Lt)	125
Figura I.6: Parámetros de la distribución para el costo del Diésel (USD/Lt).....	125

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1: Ecuación de beneficio.....	12
Ecuación 2.2: Reacción química de la calcinación de caliza	17
Ecuación 2.3: Reacción química de la hidratación de la caliza.....	18
Ecuación 2.4: Reacción química de la hidratación de la caliza.....	18
Ecuación 4.1: Modelo predictivo para el delta del precio del Diésel (USD/Lt).....	37
Ecuación 4.2:Modelo predictivo para el delta del precio del Fuel N°6 (USD/Ton)	39
Ecuación 4.3: Modelo predictivo para los deltas del precio de la energía eléctrica (CLP/kWh)	41
Ecuación 5.1: Ángulo del banco.....	44
Ecuación 5.2: Ancho de la berma (pies).....	45
Ecuación 5.3: Ancho del frente de extracción	46
Ecuación 5.4: Ecuación de Langefors	55
Ecuación 5.5: Factor de corrección según Langefors.....	56
Ecuación 5.6: Potencia relativa	56
Ecuación 5.7: Potencia rompedora relativa	56
Ecuación 5.8: Ecuación de Kuznetzov	59
Ecuación 5.9: Ecuación para estimar el factor de carga, Cunningham	60
Ecuación 5.10: Distribución granulométrica	61
Ecuación 5.11: Ecuación de Rossin- Rammler	61
Ecuación 5.12: Ecuación del índice de uniformidad	61
Ecuación 5.13: Capacidad real del equipo de carguío.....	63
Ecuación 5.14: Cálculo del tiempo de ciclo	63
Ecuación 5.15: Número de camiones	65
Ecuación 5.16: Tiempo medio de espera.....	65
Ecuación 5.17: Potencia del chancador	67
Ecuación 5.18: Área efectiva del harnero.....	71
Ecuación 5.19: Cálculo del peso de material por metro	73
Ecuación 5.20: Cálculo de la tensión efectiva.....	73
Ecuación 5.21: Cálculo del peso máximo sobre el polín de carga	74
Ecuación 5.22: Cálculo del peso máximo sobre el polín de retorno	75
Ecuación 5.23: Cálculo de potencia de la correa transportadora.....	76
Ecuación 5.24: Potencia para transporte horizontal	76
Ecuación 5.25: Potencia del elevador de capacho.....	77
Ecuación 5.26: Cálculo del radio basal de los stocks	79
Ecuación 6.1: Factor de escala para estimación de Capex.	81
Ecuación B.1: Factor G del área abierta de la superficie de cribado.....	109