



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

OPTIMIZACIÓN DE LA SELECCIÓN DE RESERVAS EN LA PLANIFICACIÓN DE LARGO PLAZO EN BLOCK CAVING

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MARCO ESTEBAN VERA HENRÍQUEZ

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
NELSON MORALES VARELA
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA**
POR: MARCO ESTEBAN VERA HENRÍQUEZ
FECHA: MAYO 2018
PROFESOR GUÍA: RAÚL CASTRO RUIZ

En un horizonte de largo plazo, la primera estimación del tamaño de una mina de Block Caving, expresada típicamente en toneladas, tiende a determinar cuerpos de dimensiones muy masivas. Esta mina resultante de gran tamaño, se obtiene al aplicar la ley de corte marginal para determinar las reservas.

No obstante, muchas veces es posible obtener el mismo o mayor beneficio, extrayendo menos reservas, en menor tiempo, y con un área activa mucho menor, lo que reduce significativamente la incertidumbre del proyecto.

La idea es entonces explorar escenarios obtenidos al aplicar una ley de corte mayor a la marginal, en las etapas iniciales del proyecto, lo que nos permitirá construir la mina y su infraestructura acorde a las reservas a extraer.

Para ello se utiliza la metodología de Hill of Value que estima el Valor Actual Neto (VAN) en función del ritmo de producción y la ley de corte. Sin embargo, la metodología estándar considera ciertas simplificaciones que generan resultados no del todo satisfactorios. En este trabajo, se pretende entonces optimizar esta metodología para tener resultados más confiables en cuanto a obtener la ley de corte que optimiza el VAN de un proyecto de Block Caving.

La metodología fue desarrollada y aplicada en 2 proyectos reales de Block Caving, siendo ambos yacimientos polimetálicos de cobre, oro y plata y zinc, plomo y plata respectivamente.

Para ambos proyectos, la metodología entrega resultados de VAN que difieren en un 15 % aproximadamente con respecto a lo estimado por el plan minero correspondiente, siendo muy simple y rápida su implementación. Además, leyes de corte superiores a la marginal, entregan un VAN considerablemente mayor.

En un trabajo futuro se recomienda profundizar el tema de la estimación del ritmo de producción mina, integrándolo con la capacidad de proceso de la planta.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN THE
GRADE OF MASTER IN MINING ENGINEERING**
BY: MARCO ESTEBAN VERA HENRÍQUEZ
DATE: MAY 2018
THESIS ADVISOR: RAÚL CASTRO RUIZ

Today, the first estimate of the size of a Block Caving mine, typically expressed in tons, tends to determine very large footprints and orebodies. This resulting large scale mine is obtained by applying the marginal cut-off grade to determine reserves.

Yet, in many cases it is possible to obtain an equal or higher benefit, extracting fewer reserves in less time, with a smaller active area, which significantly reduces the project's uncertainty.

The idea is then to explore scenarios obtained by applying the cut-off grade larger than the marginal, in the initial stages of the project, which will allow us to build the mine and its infrastructure according to the reserves to be extracted.

To enable this, the Hill of Value methodology is used to estimate the Net Present Value (NPV) in relation to production rate and the cut-off grade. However, this standard methodology considers certain simplifications that generate results that are not completely satisfactory. This proposal intends an improvement of this method in order to obtain more reliable results regarding determination of a cut-off grade profile that will optimize the NPV of a Block Caving project.

The methodology was developed and applied in 2 real projects of Block Caving, being both polymetallic ore bodies of copper, gold and silver and zinc, lead and silver respectively.

For both projects, the methodology provides NPV results that differ by approximately 15 % in comparison to the mine plan, while also being considerably simpler and faster to calculate. In addition, using cut-off grades higher than the marginal provide a significantly higher NPV.

In future work it is recommended to deepen the subject of the estimation of the mine production rate, integrating it with the plan processing capacity.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	4
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4	ALCANCES	4
1.5	CONTENIDOS	5
2	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	6
2.1	LEY DE CORTE MARGINAL	6
2.2	LEY DE CORTE ÓPTIMA	7
2.3	MODELO DE DILUCIÓN	7
2.4	VAN E IVAN	9
2.5	ESTIMACIÓN DEL BENEFICIO Y COSTO DE CAPITAL	9
2.6	MÁXIMA CAPACIDAD PRODUCTIVA	11
2.7	REVISIÓN Y ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	11
2.7.1	Revisión del estado del arte	11
2.7.2	Análisis del estado del arte	14
2.8	HILL OF VALUE	16
2.9	PLAN MINERO	17
2.10	VAN ESTIMADO POR HILL OF VALUE VERSUS PLAN MINERO	18
3	METODOLOGÍA DE TRABAJO	22
3.1	INCORPORACIÓN DE HILL OF VALUE EN LA METODOLOGÍA DE TRABAJO	22
3.2	HILL OF VALUE OPTIMIZADO	24
3.3	ANÁLISIS DE HILL OF VALUE OPTIMIZADO	26
4	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN A UTILIZAR	27
4.1	PROYECTO 1	27
4.1.1	Modelo de bloques 1	28
4.1.2	Precio de los metales, costos de venta y parámetros mineros	28
4.1.3	Ley de cobre equivalente	29
4.2	PROYECTO 2	30
4.2.1	Modelo de bloques 2	30
4.2.2	Precio de los metales, costos de venta y parámetros mineros	31

4.2.3	Ley de zinc equivalente	31
4.3	COSTOS E INVERSIONES	32
4.3.1	Inversión y costo de planta de procesos e infraestructura	32
4.3.2	Inversión y costo mina.....	34
4.4	EXCLUSIONES	36
5	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A ESTUDIAR.....	37
5.1	ETAPAS DE METODOLOGÍA PROPUESTA DE VALORIZACIÓN DE UN PROYECTO MINERO	37
5.2	ESCENARIO PROYECTO 1.....	37
5.3	ESCENARIO PROYECTO 2.....	39
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
6.1	PROYECTO 1	41
6.1.1	Selección de reservas.....	41
6.1.2	Hill of Value	42
6.1.3	Hill of Value Optimizado	44
6.1.4	Plan minero	47
6.1.5	Evaluación económica.....	51
6.2	PROYECTO 2	54
6.2.1	Selección de reservas.....	54
6.2.2	Hill of Value	55
6.2.3	Hill of Value Optimizado.....	55
6.2.4	Plan minero	58
6.2.5	Evaluación económica.....	60
6.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	62
6.3.1	Costo mina	62
6.3.2	Tasa de descuento	64
6.3.3	Precio de los metales	65
6.4	ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS.....	67
6.4.1	Ritmo de producción a través de Hill of Value Optimizado	67
6.4.2	Ritmo de producción a través del plan minero	67
6.4.3	Proyecto 1	69
6.4.4	Proyecto 2	71
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
7.1	CONCLUSIONES.....	74

7.2 RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXO A – CÁLCULO DEL VAN EN EL HILL OF VALUE.....	77
ANEXO B – FOOTPRINT MATEMÁTICO DE LAS 15 LEYES DE CORTE UTILIZADAS EN EL PROYECTO 1.....	78
ANEXO C – EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	82
ANEXO D – FOOTPRINT MATEMÁTICO DE LAS 15 LEYES DE CORTE UTILIZADAS EN EL PROYECTO 2.....	85
ANEXO E – FOOTPRINT DE BENEFICIOS POR TONELADA, PROYECTO 2.	89
ANEXO F – ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	91

Listado de Figuras

FIGURA 1-1: MINA ESQUEMÁTICA DE BLOCK CAVING A DISTINTOS BENEFICIOS DE CORTE.....	3
FIGURA 2-1: PRIMEROS 6 BLOQUES IN SITU Y DILUIDOS EN UNA COLUMNA DE BLOCK CAVING.....	8
FIGURA 2-2: CRONOLOGÍA DE ESTUDIOS RELEVANTES PARA LA TESIS	15
FIGURA 3-1: METODOLOGÍA TRADICIONAL DE VALORIZACIÓN DE UN PROYECTO MINERO ..	22
FIGURA 3-2: METODOLOGÍA PROPUESTA DE VALORIZACIÓN DE UN PROYECTO MINERO	22
FIGURA 6-1: FOOTPRINT, CORRIDA 1.....	42
FIGURA 6-2: FOOTPRINT, CORRIDA 15	42
FIGURA 6-3: SECUENCIA, CORRIDA 11	48
FIGURA 6-4: SECUENCIA, CORRIDA 12	48
FIGURA 6-5: SECUENCIA, CORRIDA 13	48
FIGURA 6-6: FOOTPRINT, CORRIDA 1.....	55
FIGURA 6-7: FOOTPRINT, CORRIDA 12	55
FIGURA 6-8: FOOTPRINT, CORRIDA 11	57
FIGURA 6-9: FOOTPRINT, CORRIDA 12	57
FIGURA 6-10: FOOTPRINT MATEMÁTICO, CORRIDA 10.....	72
FIGURA 6-11: FOOTPRINT SUAVIZADO, CORRIDA 10.....	72

Listado de Tablas

TABLA 2-1: EJEMPLO DE LA MATRIZ DE LAUBSCHER BALANCEADA PARA UN PED=50 %.....	8
TABLA 2-2: COMPARACIÓN ENTRE VAN ESTIMADO POR HILL OF VALUE Y PLAN MINERO .	19
TABLA 4-1: GEOMETRÍA DEL MODELO DE BLOQUES 1	28
TABLA 4-2: LEYES DE CU, AU Y AG DE MODELO DE BLOQUES 1.....	28
TABLA 4-3: PRECIO Y COSTO DE VENTA DE LOS METALES, PROYECTO 1	28
TABLA 4-4: PARÁMETROS MINEROS, PROYECTOS 1 Y 2	29
TABLA 4-5: RECUPERACIÓN METALÚRGICA POR ZONAS, PROYECTO 1	29
TABLA 4-6: GEOMETRÍA DEL MODELO DE BLOQUES 2.....	31
TABLA 4-7: ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL MODELO DE BLOQUES 2.....	31
TABLA 4-8: PRECIO Y COSTO DE VENTA DE LOS METALES	31
TABLA 4-9: RECUPERACIÓN METALÚRGICA, PROYECTO 2	32
TABLA 6-1: SELECCIÓN DE RESERVAS PARA LEYES DE CORTE DE CuEQ, PROYECTO 1	41
TABLA 6-2: VALORIZACIÓN DE RESERVAS PARA LEYES DE CORTE DE CuEQ, PROYECTO 1 .	44
TABLA 6-3: DIFERENCIAS ENTRE HILL OF VALUE Y HILL OF VALUE OPTIMIZADO	46
TABLA 6-4: VALORIZACIÓN DE RESERVAS OPTIMIZADA PARA LEYES DE CuEQ, PROYECTO 1	47
TABLA 6-5: VAN ESTIMADO POR HILL OF VALUE Y PLAN MINERO PARA CORRIDAS 1, 9, 10, 11, 12 Y 13, PROYECTO 1	52
TABLA 6-6: SELECCIÓN DE RESERVAS PARA LEYES DE CORTE DE ZnEQ, PROYECTO 2	54
TABLA 6-7: VALORIZACIÓN DE RESERVAS OPTIMIZADA PARA LEYES DE ZnEQ, PROYECTO 2	57
TABLA 6-8: VAN ESTIMADO POR HILL OF VALUE OPTIMIZADO Y PLAN MINERO PARA CORRIDAS 1, 6, 7, 8, 9 Y 10, PROYECTO 2	61
TABLA 6-9: VALORES UTILIZADOS EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	62
TABLA 6-10: RESUMEN DE CORRIDAS 11, 12 Y 13, PROYECTO 1	70
TABLA 6-11: RESUMEN DE CORRIDAS 8, 9 Y 10, PROYECTO 2.....	73

Listado de Gráficos

GRÁFICO 2-1: HILL OF VALUE.....	16
GRÁFICO 2-2: HILL OF VALUE PRESENTADO POR VERA & OVALLE (2014).....	20
GRÁFICO 4-1: INVERSIÓN VERSUS CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE PLANTAS E INFRAESTRUCTURA.....	33
GRÁFICO 4-2: COSTO MINA DE DIFERENTES PROYECTOS DE BLOCK CAVING	35
GRÁFICO 4-3: COSTO DE PREPARACIÓN DE DIFERENTES PROYECTOS DE BLOCK CAVING	35
GRÁFICO 6-1: HILL OF VALUE VAN>0, PROYECTO 1	42
GRÁFICO 6-2: MAYOR VAN PARA CADA LEY DE CORTE DE CuEQ, PROYECTO 1.....	43
GRÁFICO 6-3: HILL OF VALUE OPTIMIZADO VAN>0, PROYECTO 1	45
GRÁFICO 6-4: MAYOR VAN OPTIMIZADO PARA CADA LEY DE CORTE DE CuEQ, PROYECTO 1.....	46
GRÁFICO 6-5: RITMO DE PRODUCCIÓN, PROYECTO 1	49
GRÁFICO 6-6: LEY MEDIA DE CuEQ, PROYECTO 1	49
GRÁFICO 6-7: INCORPORACIÓN DE ÁREA, PROYECTO 1.....	50
GRÁFICO 6-8: INGRESOS, PROYECTO 1	51
GRÁFICO 6-9: PLAN MINERO CORRIDA 13, PROYECTO 1	53
GRÁFICO 6-10: HILL OF VALUE OPTIMIZADO VAN>0, PROYECTO 2	56
GRÁFICO 6-11: MAYOR VAN OPTIMIZADO PARA CADA LEY DE CORTE ZNEQ, PROYECTO 256	
GRÁFICO 6-12: RITMO DE PRODUCCIÓN, PROYECTO 2	58
GRÁFICO 6-13: LEY MEDIA DE ZNEQ, PROYECTO 2	59
GRÁFICO 6-14: INCORPORACIÓN DE ÁREA, PROYECTO 2.....	59
GRÁFICO 6-15: INGRESOS, PROYECTO 2	60
GRÁFICO 6-16: PLAN MINERO CORRIDA 10, PROYECTO 2	61
GRÁFICO 6-17: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD COSTO MINA, PROYECTO 1.....	63
GRÁFICO 6-18: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD COSTO MINA, PROYECTO 2.....	63
GRÁFICO 6-19: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TASA DE DESCUENTO, PROYECTO 1	64
GRÁFICO 6-20: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TASA DE DESCUENTO, PROYECTO 2	65
GRÁFICO 6-21: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PRECIO DEL COBRE, PROYECTO 1	66
GRÁFICO 6-22: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PRECIO DEL ZINC, PROYECTO 2.....	66
GRÁFICO 6-23: VAN v/s RITMO DE PRODUCCIÓN, CORRIDA 13, PROYECTO 1.....	68
GRÁFICO 6-24: VAN v/s RITMO DE PRODUCCIÓN, CORRIDA 10, PROYECTO 2.....	69
GRÁFICO 6-25: VAN v/s LEY DE CORTE CuEQ, PROYECTO 1	69
GRÁFICO 6-26: VAN v/s LEY DE CORTE ZNEQ, PROYECTO 2	71
GRÁFICO 6-27: CUBICACIÓN DE ESTÉRIL EXTRAÍDO Y MINERAL SIN EXTRAER AL PASAR DESDE EL FOOTPRINT MATEMÁTICO AL SUAVIZADO, PROYECTO 2.....	72

Listado de Ecuaciones

ECUACIÓN 2-1: LEY DE CORTE MARGINAL DE COBRE.....	7
ECUACIÓN 2-2: VALOR ACTUAL NETO (VAN)	9
ECUACIÓN 2-3: IVAN	9
ECUACIÓN 2-4: INGRESO EN EL AÑO I, CONSIDERANDO CU, AU Y AG	10
ECUACIÓN 2-5: COSTO DE OPERACIÓN EN EL AÑO I.....	10
ECUACIÓN 2-6: MÁXIMA CAPACIDAD PRODUCTIVA POR DÍA PARA BLOCK CAVING	11
ECUACIÓN 2-7: RITMO DE PRODUCCIÓN SEGÚN TAYLOR	14
ECUACIÓN 2-8: VIDA ÚTIL DE LA MINA SEGÚN TAYLOR	14
ECUACIÓN 2-9: VAN ESTIMADO A TRAVÉS DE HILL OF VALUE.....	17
ECUACIÓN 4-1: LEY DE COBRE EQUIVALENTE, ZONA SUPERIOR, PROYECTO 1	30
ECUACIÓN 4-2: LEY DE COBRE EQUIVALENTE, ZONA INTERMEDIA, PROYECTO 1	30
ECUACIÓN 4-3: LEY DE COBRE EQUIVALENTE, ZONA INFERIOR, PROYECTO 1	30
ECUACIÓN 4-4: LEY DE ZINC EQUIVALENTE, PROYECTO 2	32
ECUACIÓN 4-5: INVERSIÓN DE PLANTA DE PROCESOS E INFRAESTRUCTURA ASOCIADA.....	33
ECUACIÓN 4-6: INVERSIÓN MINA PARA BLOCK CAVING	34

1 INTRODUCCIÓN

La evolución de la minería subterránea explotada por hundimiento, específicamente para minas de Block Caving en Chile y en el mundo, ha tenido un desarrollo importante en las últimas décadas. Sin embargo, la determinación de las reservas mineras en etapas iniciales de este tipo de proyectos, especialmente en la planificación de largo plazo, no se estudia con el detalle que debiera hacerse en cuanto a su repercusión en el valor final del negocio.

En un horizonte de largo plazo, la primera estimación del tamaño de una mina de Block Caving, expresada típicamente en toneladas, tiende a determinar cuerpos de dimensiones muy masivas. Esta mina resultante de gran tamaño, se obtiene al aplicar la ley de corte marginal para determinar las reservas. No obstante, muchas veces es posible obtener el mismo o mayor beneficio, extrayendo menos reservas, en menor tiempo, y con un área activa mucho menor, lo que reduce significativamente la incertidumbre del proyecto.

La idea es entonces explorar escenarios obtenidos al aplicar una ley de corte mayor a la marginal, en las etapas iniciales del proyecto, lo que nos permitirá construir la mina y su infraestructura acorde a las reservas a extraer. Este último punto representa una gran ventaja, ya que la aplicación de una ley de corte variable en la etapa de operación, no permite modificar el diseño de la mina, sino solamente cerrar los puntos de extracción en el momento óptimo.

La dificultad de determinar una ley de corte en la etapa inicial del proyecto es que no se cuenta con la información suficiente para estimar el costo mina, el costo planta, la inversión de la mina, la inversión de la planta, la recuperación metalúrgica, el precio del elemento a extraer y el costo de venta del producto, entre otros, que nos permita determinar la ley de corte óptima.

1.1 Motivación del estudio

En periodos en que el precio de los metales está por debajo de su valor promedio histórico, muchas veces se intensifica el hecho de declarar la mayor cantidad de reservas en un proyecto minero. Esto se logra utilizando la ley de corte marginal, lo que como ha sido mencionado, no necesariamente entrega el máximo retorno para el proyecto.

En un escenario especulativo, pudiera ser interesante declarar más reservas para atraer inversionistas que puedan financiar las grandes inversiones que requiere un Block Caving. Pero en un escenario puramente costo-beneficio, es recomendable explorar una selección de reservas con leyes de corte mayores a la marginal.

La Figura 1-1 representa una mina de Block Caving en forma esquemática, donde al aplicar la ley de corte marginal, sus reservas encierran un volumen compuesto de 5 columnas con 3 bloques por columna. Cabe destacar que se usa el lenguaje tradicional de ley de corte, pero una opción mejor en la era de la computación es calcular el beneficio de corte obtenido a partir de la ley del elemento, precio del metal, costos de fundición, refinación, transporte y venta, recuperación metalúrgica, costo mina y costo de proceso. Además del escenario marginal con beneficio de corte igual a cero, se presentan otro cuatro a distintos beneficios de corte: 1 USD, 2 USD, 3 USD y 4 USD. Para cada uno de los 5 escenarios, se calcula el beneficio nominal y actualizado a una tasa de descuento del 10 %. La secuencia considera la extracción de izquierda a derecha, de abajo hacia arriba.

Como se aprecia en la Figura 1-1, los 5 escenarios de beneficio definidos seleccionan distintas reservas, a saber: 15 bloques, 12 bloques, 10 bloques, 7 bloques y 5 bloques respectivamente.

Considerando el beneficio nominal, el escenario marginal entrega el mayor beneficio con 45,5 USD. Pero si consideramos el beneficio actualizado, el escenario de corte a 2 USD es el que reporta un mayor retorno con 26,7 USD. Obviamente, este último escenario es el óptimo entre los 5 definidos, ya que considera el valor del dinero en el tiempo.

Beneficio marginal 0 USD					Beneficio nominal (USD)	Beneficio actualizado (USD)
0,5	1	0,5	1	0,5	45,5	23,4
2	7	5	2	2		
3	8	6	4	3		
Beneficio de corte 1 USD					Beneficio nominal (USD)	Beneficio actualizado (USD)
	1		1		44	25,0
2	7	5	2	2		
3	8	6	4	3		
Beneficio de corte 2 USD					Beneficio nominal (USD)	Beneficio actualizado (USD)
					42	26,7
2	7	5	2	2		
3	8	6	4	3		
Beneficio de corte 3 USD					Beneficio nominal (USD)	Beneficio actualizado (USD)
		7	5		36	25,6
3	8	6	4	3		
Beneficio de corte 4 USD					Beneficio nominal (USD)	Beneficio actualizado (USD)
		7	5		30	23,5
		8	6	4		

Figura 1-1: Mina esquemática de Block Caving a distintos beneficios de corte

Si analizamos la diferencia entre el escenario marginal y el de 4 USD, este último extrae solamente un tercio de las reservas (5 bloques en lugar de 15 bloques), obteniendo un beneficio actualizado prácticamente igual al marginal (23,5 USD versus 23,4 USD). La selección del escenario óptimo pasa en este caso, por una mirada estratégica de la compañía:

- Si consideramos que preparar y explotar una mina de dimensiones significativamente menores, reduce la incertidumbre del proyecto minero, se seleccionará el escenario de beneficio de corte de 4 USD.
- Si consideramos que hay una apuesta implícita a un mercado de metales con precios crecientes, se seleccionará el escenario de beneficio marginal.

1.2 Objetivo General

- Establecer una metodología para optimizar la selección de reservas mineras en Block Caving que maximicen el valor del negocio en la planificación de largo plazo.

1.3 Objetivos Específicos

- Cuantificar las diferencias de retorno económico entre proyectos que seleccionan reservas con leyes de corte marginal y superiores.
- Optimizar la metodología de Hill of Value para tener resultados similares a lo que permite un plan minero en cuanto a VAN y ley de corte óptima.

1.4 Alcances

- El presente estudio se enfoca en la selección óptima de reservas para 2 proyectos reales de Block Caving, utilizando para ello sus modelos de bloques correspondientes.
- Se definen parámetros técnico-económicos propios de un Block Caving, obtenidos de proyectos similares.
- Se considera la dilución de columnas por medio de la metodología de Laubscher.
- Se valorizan los bloques diluidos de acuerdo a los parámetros económicos definidos.
- Se seleccionan las alturas óptimas de columna, considerando mínimos y máximos factibles.
- Se seleccionan los pisos y footprint que entregan el mayor beneficio.
- Se preparan gráficamente los footprint para analizar factibilidad de explotación por Block Caving.
- Se repiten nuevamente los últimos 5 pasos, para distintas leyes de corte (15 en total para cada proyecto).
- Se estima el VAN para cada ley de corte, considerando 30 ritmos de producción. Se selecciona el ritmo de producción que maximiza el VAN.
- Se realiza el plan minero para las leyes de corte que tienen el mayor VAN.
- Se realiza la evaluación económica para cada una de las leyes de corte seleccionadas.

1.5 Contenidos

- **Capítulo 1, Introducción**
Se presenta la motivación del estudio a desarrollar, definiéndose la problemática y justificación del mismo. Se plantean objetivos generales, específicos y alcances del estudio.
- **Capítulo 2, Antecedentes bibliográficos**
Se realiza una revisión del estado del arte de la selección de reservas mineras, definiendo los principales indicadores que permiten valorizar un proyecto minero en una etapa inicial de su estudio.
- **Capítulo 3, Metodología de trabajo**
Se define la metodología del trabajo, que permite abordar los alcances del estudio para alcanzar los objetivos planteados.
- **Capítulo 4, Análisis de información a utilizar**
Se realiza una recopilación de información de grandes proyectos de Block Caving para establecer fórmulas empíricas que permitan estimar costos, inversiones y definir los parámetros técnico-económicos a utilizar. Además, se describen los modelos de bloques que serán utilizados en los ejercicios posteriores, presentando sus estadísticas básicas.
- **Capítulo 5, Definición de escenarios a estudiar**
Se define el escenario base a estudiar, junto a los escenarios propuestos en el estudio.
- **Capítulo 6, Análisis de resultados**
Se presentan los resultados obtenidos en cada escenario propuesto y su análisis comparativo con respecto al escenario base, junto con uno de sensibilidad del costo mina, tasa de descuento y precio del metal.
- **Capítulo 7, Conclusiones y recomendaciones**
Se establecen las conclusiones generales del trabajo, junto con las recomendaciones a seguir en un potencial trabajo futuro.

2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

La mayor parte del retorno económico de un proyecto minero se define en el proceso de identificación de reservas. Es una práctica común en la industria minera de Block Caving utilizar la ley de corte marginal en la definición de reservas con el objetivo de maximizar el tonelaje a extraer o la capacidad de producción. Sin embargo, esto no garantiza el mejor retorno económico.

En una etapa inicial de un proyecto, tal como ingeniería de perfil o prefactibilidad, existe mayor incerteza en la estimación de costos, ingresos e inversiones, debido a que se cuenta con información muy preliminar. Esta incerteza obviamente repercute en la estimación de la ley de corte que es utilizada al identificar las reservas a extraer.

En la planificación minera de un proyecto, una vez definido el volumen a extraer, proceso denominado selección de reservas, el siguiente paso es preparar el plan de producción y preparación minera, el cual es evaluado económicamente a través de la estimación del VAN e IVAN en la mayoría de los casos.

A continuación, se definen conceptos relevantes que son utilizados en este trabajo tales como, ley de corte marginal, ley de corte óptima, modelo de dilución, VAN e IVAN, estimación del beneficio y costo de capital, máxima capacidad productiva y VAN a través del Hill of Value y plan minero. Además se presenta una revisión del estado del arte a la fecha.

2.1 Ley de corte marginal

La ley de corte marginal se define como aquella que hace nulo el beneficio económico de la explotación del mineral. Para determinar la ley de corte en un Block Caving, se evalúan las columnas del modelo de bloques diluido calculando el beneficio asociado a la explotación en función de su altura de extracción. El mayor beneficio acumulado define la altura de extracción seleccionada, siempre y cuando sea positivo. Si todos los beneficios acumulados son negativos, la columna no formará parte del footprint.

El formulismo utilizado para el cálculo de la ley de corte marginal se presenta en Ecuación 2-1, considerando arbitrariamente el elemento cobre:

$$L_{cm} = \frac{M}{(P_{Cu} - S_{Cu}) * R_M}$$

Ecuación 2-1: Ley de corte marginal de cobre

Dónde:

L_{cm} = ley de corte marginal de cobre (Cu).

M = costo mina y de proceso por tonelada de mineral.

P_{Cu} = precio del Cu.

S_{Cu} = costo de venta del Cu.

R_M = recuperación metalúrgica del Cu.

2.2 Ley de corte óptima

La ley de corte óptima es aquella que maximiza el beneficio económico, que para el caso de un Block Caving, no existe una metodología precisa que permita su cálculo. La idea entonces es acercarnos a esta ley óptima a través de una metodología a desarrollar en este trabajo.

2.3 Modelo de dilución

La importancia de modelar adecuadamente la dilución de acuerdo a las características de cada yacimiento y del método de explotación a utilizar es fundamental en el negocio minero, afectando directamente los costos de operación, la recuperación minera y la dilución. Dentro del alcance de este trabajo, no se profundiza en este aspecto, lo que no significa que es de vital importancia en la cadena de valor de un proyecto minero.

Se considera en este estudio la metodología de Laubscher para modelar la dilución, considerando un punto de entrada de dilución del 50 % (PED = 50 %), de la siguiente forma:

- La Figura 2-1 es una pila de los primeros 6 bloques in situ y diluidos (25 m x 25 m x 15 m) del modelo de bloques que forma una columna para el Block Caving.
- El modelo volumétrico de Laubscher dibuja una primera línea desde el 50 % del bloque in situ 1 a través de la mitad de la parte superior del bloque 1, para formar el nuevo bloque diluido, con el mismo volumen. Por lo tanto, el 12,5 % del bloque in situ 1 queda como remanente y el 12,5 % del bloque in situ 2 es

incorporado al bloque diluido 1 (formado entonces por un 87,5 % del bloque in situ 1 y un 12,5 % del bloque in situ 2).

- Una segunda línea es dibujada al 50 % de la columna formada por el bloque in situ 1 y el bloque in situ 2, a través de la mitad de la parte superior del bloque 2, para formar el bloque diluido 2, con el mismo volumen. Por lo tanto, el bloque diluido 2 está formado por un 12,5 % del bloque in situ 1, 62,5 % del bloque in situ 2, 20,8 % del bloque in situ 3 y 4,2 % del bloque in situ 4.

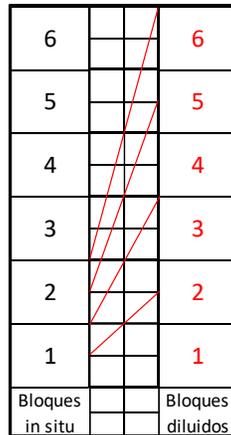


Figura 2-1: Primeros 6 bloques in situ y diluidos en una columna de Block Caving

- El proceso se repite para formar la matriz de dilución de la Tabla 2-1, considerando en este caso una columna formada por 12 bloques.

Tabla 2-1: Ejemplo de la matriz de Laubscher balanceada para un PED=50 %

		Bloques in situ												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Bloques diluidos	1	87,5	12,5											100
	2	12,5	62,5	20,8	4,2									100
	3		25,0	41,7	20,8	10,0	2,5							100
	4			33,3	29,2	17,5	11,7	6,6	1,8					100
	5			4,2	33,3	22,5	15,0	10,7	8,0	4,9	1,4			100
	6				12,5	27,5	18,3	13,1	9,8	7,6	6,1	3,9	1,1	100
	7					20,1	22,7	16,3	12,2	9,5	7,6	6,2	5,2	100
	8					2,4	23,2	21,3	16,0	12,4	9,9	8,1	6,8	100
	9						6,6	23,5	21,0	16,3	13,0	10,7	8,9	100
	10							8,5	25,4	22,0	17,6	14,4	12,0	100
	11									5,8	26,0	27,2	18,7	100
	12										1,2	17,1	34,3	47,3
		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1,200

2.4 VAN e IVAN

Estos indicadores son los más utilizados en la industria minera para determinar el valor de un proyecto, los que se definen a continuación:

- VAN

El VAN estima el flujo de caja resultante de un modelo financiero considerando una tasa de descuento, de acuerdo a la Ecuación 2-2:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^L \frac{B_i}{(1+r)^i}$$

Ecuación 2-2: Valor Actual Neto (VAN)

Dónde:

VAN = Valor Actual Neto.

r = tasa de descuento.

I = inversión (costo de capital).

B_i = beneficio en el año *i*.

i = año *i*, desde 1 a *L*.

L = vida del proyecto.

- IVAN

El IVAN estima el retorno sobre la inversión a través de la Ecuación 2-3:

$$IVAN = \frac{VAN}{I}$$

Ecuación 2-3: IVAN

Dónde:

IVAN = retorno sobre la inversión

2.5 Estimación del beneficio y costo de capital

De acuerdo a la Ecuación 2-2, es necesario determinar *B_i* e *I* para estimar el VAN:

- *B_i*

$B_i = \text{Beneficio en el año } i = \text{Ing}_i - \text{Co}_i$

- *Ing_i* (suponiendo por ejemplo que Cu, Au y Ag son los elementos de interés)

$$\text{Ing}_i = \text{TPA}_i \times \left\{ (L_{\text{Cu}} \times R_{\text{Cu}} \times (P_{\text{Cu}} - S_{\text{Cu}}) \times 2.204,62) + (L_{\text{Au}} \times R_{\text{Au}} \times (P_{\text{Au}} - S_{\text{Au}}) \times 31,10) \right\} + (L_{\text{Ag}} \times R_{\text{Ag}} \times (P_{\text{Ag}} - S_{\text{Ag}}) \times 31,10)$$

Ecuación 2-4: Ingreso en el año i, considerando Cu, Au y Ag

Dónde:

Ing_i = ingreso en el año i (USD).

TPA_i = toneladas por año en el año i.

L_{ME} = ley particular de un elemento: Cu (%), Au (g/t), Ag (g/t).

P_{ME} = precio del elemento particular: Cu (USD/t), Au (USD/oz), Ag (USD/oz).

S_{ME} = costo de venta del elemento en particular: Cu (USD/t), Au (USD/oz), Ag (USD/oz).

- *Co_i*

$$\text{Co}_i = \text{TPA}_i \times \left(C_m + \left\{ \frac{C_d \times A_t}{\text{TON}} \right\} + C_p \right)$$

Ecuación 2-5: Costo de operación en el año i

Dónde:

Co_i = costo de operación en el año i (USD/t).

C_m = costo mina (USD/t).

C_d = costo de preparación (USD/m²).

C_p = costo de procesamiento (USD/t).

A_t = área total del footprint (m²).

TON = reservas totales (t).

- *I*

I = costo de capital (mina + proceso + infraestructura)

2.6 Máxima capacidad productiva

La capacidad productiva de un Block Caving es bastante mayor a la de otros métodos subterráneos, sin embargo, está limitada por la altura del bloque a explotar, la velocidad de preparación, la densidad del material y la recuperación minera a través de la Ecuación 2-6 (Ovalle, 2012):

$$TPD_{MAX} = \frac{H * V_p * \rho_o * R_o^2}{DpA} \quad 1$$

Ecuación 2-6: Máxima capacidad productiva por día para Block Caving

Dónde:

TPD_{MAX}	= máxima capacidad productiva por día (t/d).
H	= altura media del bloque a explotar (m).
V_p	= velocidad de preparación (m ² /año).
ρ_o	= densidad del material (t/m ³).
R_o	= recuperación minera (fracción de 1).
DpA	= días por año.

2.7 Revisión y análisis del estado del arte

2.7.1 Revisión del estado del arte

La optimización de la ley de corte es la base para maximizar el VAN, en virtud de lo cual, el desarrollo de este trabajo se centra en estudiar y desarrollar la metodología que permita optimizarla. Para ello, se revisan los avances alcanzados a la fecha, realizado por diferentes autores.

Lane (1964)², desarrolla un algoritmo que tiene como función objetivo la maximización del VAN a través de la ley de corte, utilizando un proceso iterativo entre estas variables. Considera restricciones que afectan al proceso minero, tales como, las capacidades a las que están sujetas las etapas de minería, procesamiento y beneficio del mineral.

¹ Alfonso Ovalle, "Maximum Mass Caving Production Capacity", Sudbury, MASSMIN 2012.

² Lane, K. F., "Choosing the optimum cut-off grade", Colorado School of Mines Quarterly, Vol. 59, N°4, 1964.

Lane (1988)³ logra recopilar los avances alcanzados a esa fecha en el desarrollo de políticas de optimización de ley de corte en el programa de computación OGRE (Optimum Grades for Resource Exploitation), con el objetivo de brindar una herramienta que facilite la determinación de la ley de corte en la etapa de operación de una mina.

De la Huerta (1994)⁴ toma como base la metodología de Lane (1988) aplicada preferentemente en minas a cielo abierto y la aplica a una mina de Block Caving. En su análisis, concluye que el VAN aumenta un 50 % aproximadamente considerando criterios de costo de oportunidad por sobre el método tradicional marginalista, las reservas extraíbles disminuyen en torno a un 12 % y las variaciones del perfil de inversiones son menores al 5 %, manteniéndose prácticamente inalterable el monto total de ellas.

B.E. Hall (2003)⁵ determina un montículo de valor o “Hill of Value”, correspondiente a una función de 2 variables. En el capítulo 2.8 se explica su desarrollo.

Rendu (2008)⁶ agrupa los avances en la estimación de la ley de corte en los últimos 30 años, los principios y conceptos sobre los que se ha desarrollado, integrando un análisis de las implicancias que tiene en la operación minera su optimización con el objetivo de optimizar el VAN sustentado en el costo de oportunidad y otros costos asociados.

Vera & Ovalle (2014)⁷ realizan ejercicio de optimización del Hill of Value para Block Caving, donde entregan resultados que demuestran obtener un mayor VAN utilizando una ley de corte mayor a la marginal. En el capítulo 2.10 se exponen más detalles de este trabajo.

³ Lane, K. F. “The economic definition of ore, cutoff grades in theory and practice”, Mining Journal books: London, 1988.

⁴ Francisco de la Huerta, “Aplicación del criterio de costo de oportunidad en la planificación de producción de minas subterráneas”, Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, 1994.

⁵ B. E. Hall, “How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value”, CIM Mining Conference and Exhibition, Montreal, 2003.

⁶ Jean Michel Rendu, “An introduction to cut-off grade estimation”, SME, 2008.

⁷ Marco Vera, Alfonso Ovalle, “Optimizing Hill of Value for Block Caving” Tercer simposio internacional en Block y Sublevel Caving, 2014.

Vargas (2014)⁸ propone incorporar incertidumbre geológica en el cálculo del piso económico y estimación de reservas económicas para un yacimiento a explotar por el método de Block Caving. La variabilidad geológica se modela mediante simulaciones geoestadísticas que producen varios planes o evaluaciones económicas que pueden ser muy diferentes a los obtenidos durante la explotación minera. En las simulaciones realizadas se obtienen diferencias en torno al 10 % del valor económico del footprint y una diferencia de hasta 50 metros en la ubicación del piso económico, sin considerar costos de desarrollo.

Vásquez (2017)⁹ propone una metodología integrada de planificación de preparación y producción en una mina operada mediante Panel Caving para optimizar el VAN mediante programación entera mixta (MIP) implementada en el software UDESS.

Rodríguez (2018)¹⁰ propone una nueva metodología para maximizar el VAN basado en la secuencia de planificación conjunta cielo abierto a Panel Caving. Se calculan las envolventes económicas para la mina a cielo abierto y la mina de Panel Caving, considerando potenciales pilares coronas entre ellos a modo de estabilidad. Después, se realiza el secuenciamiento de bloques y la maximización del VAN, considerando restricciones operacionales y geomecánicas para estudiar su influencia en el agendamiento.

Adicionalmente a los estudios citados, es importante revisar más antecedentes con respecto al ritmo de producción, vida útil de la mina y estimación de la recuperación minera en un Block Caving. Si bien estos últimos tópicos no forma parte esencial de este trabajo, son necesarios para la aplicación de la nueva metodología propuesta.

⁸ Emilio Vargas, "Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica", Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Universidad de Chile, 2014.

⁹ Javier Vasquez, "Optimization of Mining Planning in Block / Panel Caving Mines Including Development Activities", APCOM 2017, Colorado, USA, 2017.

¹⁰ Manuel Rodríguez, "Optimización del plan de producción conjunto cielo abierto - subterránea", Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Universidad de Chile, 2018.

- Ritmo y vida útil de una mina

Para estimar la capacidad de producción y vida útil de una mina, se utiliza la Ecuación 2-7 y Ecuación 2-8, obtenidas a partir de evidencia empírica por Taylor¹¹.

$$Rp = 0,15 * R^{0,75} * (1 \pm 0,2)$$

Ecuación 2-7: Ritmo de producción según Taylor

$$Vu = 6,5 * R^{0,25} * (1 \pm 0,2)$$

Ecuación 2-8: Vida útil de la mina según Taylor

Dónde:

Rp = ritmo de producción (Mt/año).

Vu = vida útil de la mina (años).

R = reservas mineras (Mt).

- Recuperación minera

La recuperación minera para un proyecto de Block Caving se estima en un 90 %, valor que fue obtenido de un estudio de Raúl Castro (2009)¹² para el Proyecto Nuevo Nivel Mina de Codelco.

2.7.2 Análisis del estado del arte

La revisión de la literatura en cuanto a la optimización de la ley de corte, da luces del esfuerzo realizado tanto a nivel de operaciones, como también en una mirada más estratégica de proyecto. No obstante, la mayoría de los estudios se han enfocado en la aplicación en minas explotadas por cielo abierto. Prueba de esto último es que existen metodologías implementadas en software mineros que incorporan el costo de oportunidad, tal como COMET.

¹¹ Taylor H.K., “Rates of Working Mines – A Simple Rule of Thumb”, nota técnica Vol. 95, 1986.

¹² R. Castro, E. Gonzalez, E. Arancibia, “Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving”, Vol. 109, Journal 2009.

En términos de hacer un análisis más enfocado en los estudios relacionados directamente con este trabajo, se presenta su cronología en la Figura 2-2.

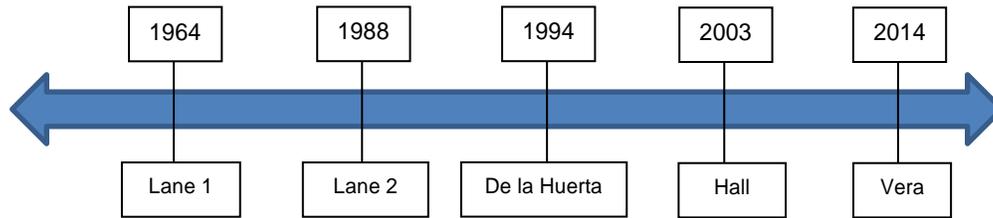


Figura 2-2: Cronología de estudios relevantes para la Tesis

La teoría de Lane (1964 y 1988) es aplicable a cualquier tipo de yacimiento, y plantea la incorporación del costo de oportunidad en una explotación minera. Sin embargo, como ya ha sido mencionado se ha aplicado mayormente en minas a cielo abierto, a través de la optimización de la secuencia de extracción.

Una de las primeras aplicaciones de la teoría de Lane en una mina de Block Caving fue el estudio de De la Huerta (1994). La principal conclusión de este trabajo es que el escenario marginalista entrega un VAN menor al que considera el de costo de oportunidad. Es importante mencionar que en este estudio, la definición de los límites en el plano horizontal (footprint), se realiza utilizando la ley de corte marginal (beneficio nulo), para a partir de este punto, aplicar el algoritmo de costo de oportunidad.

La metodología de De la Huerta está diseñada para ser aplicada en una etapa de Ingeniería básica o de detalles, cuando ya ha sido definida la elevación del nivel de hundimiento y el footprint y estamos interesados en determinar la altura óptima para cada una de estas columnas.

Sin embargo, en una ingeniería de perfil o estudio exploratorio, la elevación del nivel de hundimiento y el footprint generalmente no son un dato de entrada, sino más bien forman parte de una las principales definiciones que queremos realizar. Idealmente, sería de gran utilidad contar con alguna metodología que estime el VAN para diferentes leyes de corte y ritmos de producción, generando distintas elevaciones del nivel de hundimiento y footprint. Un desarrollo que estudia parte de esta problemática fue presentado por Hall (2003) y es explicado con más detalle en el capítulo 2.8.

Una aplicación del trabajo de Hall en un proyecto de Block Caving fue realizada por Vera (2014), donde en el capítulo 2.10 se dan a conocer los resultados y principales conclusiones de su trabajo. Su estudio entrega resultados interesantes en cuanto a acercarnos a estimar la ley de corte que optimiza el VAN, pero no así su valor.

Este trabajo de Tesis se centra en optimizar este último estudio, mejorando ciertos supuestos descritos en el capítulo 2.10, con el objetivo de obtener resultados más satisfactorios en cuanto a la ley de corte que optimiza el VAN y su valor en un horizonte de largo plazo para una mina de Block Caving.

2.8 Hill of Value

De acuerdo a B.E. Hall (2003), es posible determinar un montículo de valor o “Hill of Value”, correspondiente al cálculo del VAN en función de dos variables, como se observa en el Gráfico 2-1:

- Ritmo de producción: impacta en la temporalidad de los flujos de caja, ya sean inversiones, costos e ingresos.
- Ley de corte: impacta en la selección de reservas mineras, discriminando entre estéril y mineral.

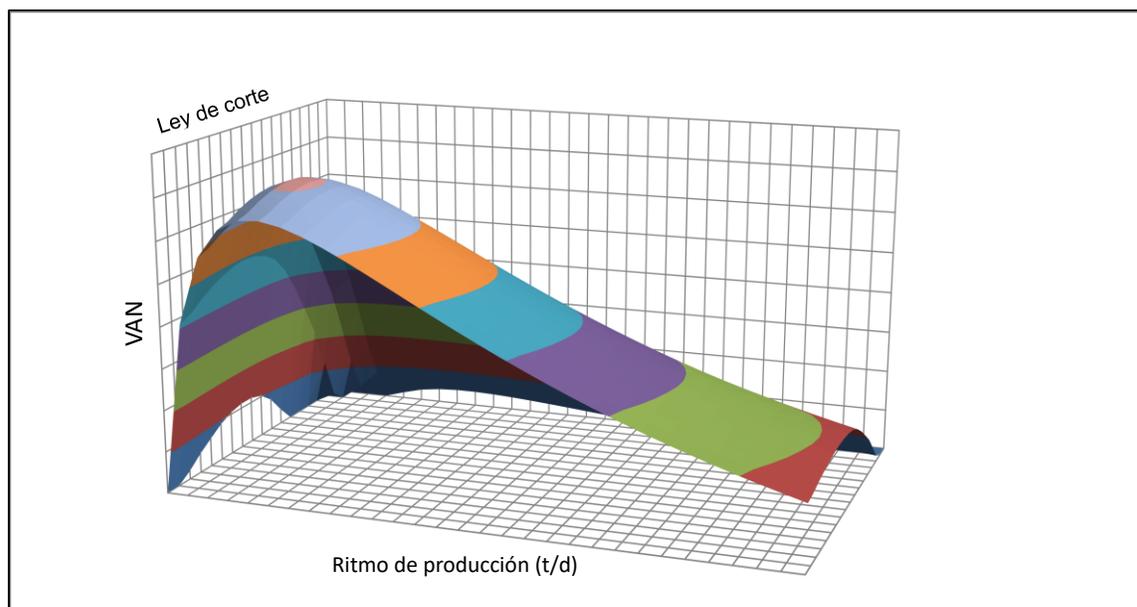


Gráfico 2-1: Hill of Value

El Gráfico 2-1 representa un resultado típico al aplicar esta metodología, la que permite entonces obtener una primera aproximación de la mejor combinación ritmo de producción y ley de corte que genera el mejor negocio, considerando el VAN.

A través de la metodología de Hill of Value, el VAN puede ser estimado por la Ecuación 2-9. En Anexo A, es demuestra cómo es obtenida a partir de la ecuación general del VAN (Ecuación 2-2).

$$VAN = I + VAN_{SI} = I + \frac{Bq(1 - q^n)}{1 - q}$$

Ecuación 2-9: VAN estimado a través de Hill of Value

Dónde:

VAN = Valor Actual Neto.

VAN_{SI} = Valor Actual Neto sin considerar la inversión.

I = inversión.

r = tasa de descuento.

q = 1/(1+r).

n = número de periodos.

B = beneficio.

La Ecuación 2-9 estima el VAN de una forma aproximada, considerando los siguientes supuestos: capacidad de producción constante, ley media constante, inversiones en el año previo a la entrada en producción, footprint matemático y recuperación minera del 100 %.

2.9 Plan minero

La estimación del VAN a través de Hill of Value es una forma no convencional o alternativa de estimar el valor de un proyecto minero.

La forma más convencional de obtener una estimación del VAN en una etapa inicial de un proyecto, es a través de la preparación de un plan minero y sus ingresos, costos e inversiones asociadas. Por este motivo, en este capítulo se explica en forma general las etapas involucradas en su elaboración.

La preparación de un plan minero tiene entre sus definiciones principales, suavizar columnas, secuenciamiento, incorporación de área, velocidades de extracción y la simulación de la extracción propiamente tal:

- El suavizamiento de columnas es el proceso de regularizar el footprint y las alturas de columna, considerando una geometría del volumen a extraer compatible con las características de un Block Caving. Como resultado de este proceso, se incluirá estéril y se dejará de extraer mineral en la selección final de reservas.
- El secuenciamiento corresponde a definir el mejor orden de apertura de columnas, con el objetivo de maximizar el beneficio por tonelada. La idea es dar un orden que sea compatible con la continuidad propia de un Block Caving, respetando anchos mínimos del frente de extracción y evitando convergencia de frentes.
- La incorporación de área busca utilizar una estrategia que permita cumplir los requerimientos de producción, con un área que oscile entre el 70 % y 80 % de utilización. Una estrategia común es abrir una área mayor los primeros años, para posteriormente una vez que se haya asegurado la propagación del caving, incorporar área en forma constante, para facilitar su preparación. Esto último permite tener una flota de equipos y dotación de personal constante en el tiempo para realizar la preparación minera, lo que es muy conveniente porque facilita la gestión y en consecuencia se traduce en menores costos y menor riesgo de incumplimiento.
- Las velocidades de extracción son bastante bajas entre el 0 y 30 % de extracción, aproximadamente $0,30 \text{ t/m}^2\text{-d}$ dependiendo en este rango, de la propagación del caving. Por sobre el 30 % de extracción las velocidades varían entre $0,60 \text{ t/m}^2\text{-d}$ y $1,00 \text{ t/m}^2\text{-d}$, dependiendo en este rango del manejo de materiales.
- En la simulación de la extracción, a partir de un tonelaje requerido por periodo, las variables anteriores van restringiendo la capacidad productiva y se obtiene el plan de producción.

2.10 VAN estimado por Hill of Value versus plan minero

Como fue detallado en el capítulo 2.9, la preparación de un plan minero en un Block Caving es un proceso que involucra varias etapas y puede llevar un tiempo no menor en su ejecución, tomando en cuenta además que se deben incorporar

restricciones operacionales, tales como presencia de agua y barro, existencia de otros sectores en explotación, limitantes por alta ley de contaminantes como arsénico, plomo etc. Además, es importante generar distintas estrategias de extracción, cada una de las cuales, corresponde a un distinto plan minero.

La idea entonces es perfeccionar la metodología de Hill of Value que fue presentada en el capítulo 2.8, para obtener un resultado en VAN y ley de corte, lo más óptimo posible, invirtiendo un tiempo mucho menor al considerado en la elaboración de un plan minero. El problema radica en que existen simplificaciones en esta metodología que pueden distorsionar la estimación del VAN, las que se detallan en la Tabla 2-2:

Tabla 2-2: Comparación entre VAN estimado por Hill of Value y plan minero

VAN estimado por Hill of Value	VAN estimado a partir de un plan minero
Capacidad de producción constante	Capacidad de producción variable en el tiempo
Ley media constante	Ley media variable
Inversiones en el año previo a la entrada en producción	Perfil de inversiones en el tiempo
Footprint matemático	Footprint suavizado
Recuperación minera del 100 %	Recuperación minera menor al 100 %

El estudio presentado por Vera & Ovalle (2014), da cuenta de las diferencias en la estimación del VAN que se obtiene al utilizar la metodología de Hill of Value y el estimado al realizar propiamente el plan minero. El resultado de esta comparación se presenta en Gráfico 2-2.

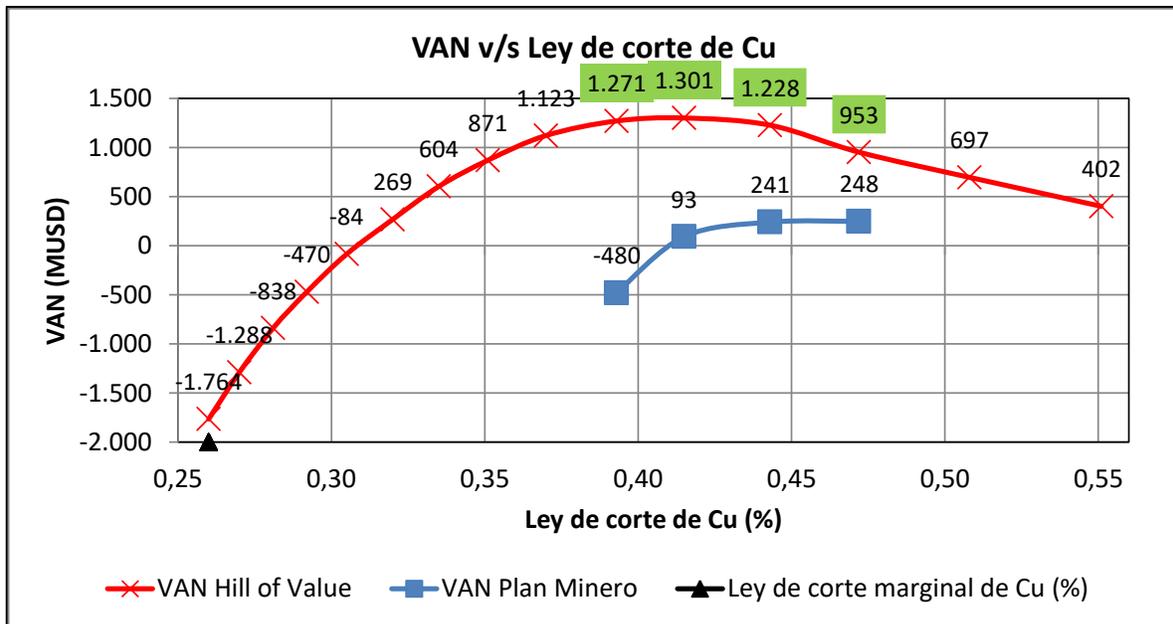


Gráfico 2-2: Hill of Value presentado por Vera & Ovalle (2014)

La metodología se aplicó a un proyecto de cobre de Block Caving y se aprecia que aunque el VAN es significativamente distinto entre ambas series, la ley de corte que lo maximiza está en el rango 0,42-0,45 %Cu aproximadamente.

Para la serie correspondiente al plan minero, leyes de corte mayores a 0,47 %Cu generan un footprint matemático no continuo en este caso en particular (con muchas zonas aisladas), lo que imposibilita la selección de Block Caving como método de explotación.

Adicionalmente, en la Gráfico 2-2, se observa también que la ley de corte marginal de 0,25 %Cu entrega un VAN absolutamente menor al obtenido con leyes de corte en el rango 0,42-0,45 %Cu. Por lo tanto, de antemano ya sabemos que los planes mineros preparados en este último rango de ley de corte, tendrán un VAN mayor.

Las conclusiones principales del trabajo de Vera & Ovalle (2014) son:

- Seleccionar reservas con leyes de corte mayores a la marginal, entrega un VAN mayor.
- La metodología de Hill of Value permite determinar el rango de ley de corte en donde se puede obtener el mayor VAN.

- El VAN estimado por Hill of Value es un orden de magnitud mayor al estimado por el plan minero, por lo que su valor nominal sólo puede ser utilizado en forma referencial o para un análisis comparativo.
- Una regla práctica obtenida a partir de aplicar esta metodología a varios proyectos de Block Caving es la siguiente: una forma de acercarnos al óptimo VAN es realizar planes mineros con 3 diferentes leyes de corte. La primera ley de corte es la que tiene el mayor VAN en Hill of Value y las otras 2, son las leyes de corte inmediatamente superiores a la primera. Por ejemplo, en el Gráfico 2-2, los planes mineros debieran hacerse sobre las leyes de corte de Cu que tienen un VAN Hill of Value de 1.301, 1.228 y 953 MUSD.

La metodología de Hill of Value recién descrita es el punto de partida de este trabajo. Como ya ha sido mencionado en la Tabla 2-2, existen ciertas simplificaciones en esta metodología, que hacen que el VAN sea sobreestimado.

La metodología de Hill of Value Optimizada es desarrollada y aplicada en este trabajo de tesis y se centra fundamentalmente en abordar las simplificaciones recién mencionadas.

Ambas metodologías son definidas, analizadas e incorporadas en la valorización de un proyecto minero en el siguiente capítulo.

3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Incorporación de Hill of Value en la metodología de trabajo

En la definición de los escenarios a evaluar es importante establecer que un proyecto minero y en particular uno de Block Caving, en una forma muy general y considerando una mirada de largo plazo, es valorizado por medio de los pasos secuenciales de la Figura 3-1. Se seleccionan reservas considerando una ley o beneficio de corte, se realiza el plan minero del cuerpo seleccionado, el cual posteriormente es evaluado económicamente tomando en consideración sus ingresos, costos e inversiones.



Figura 3-1: Metodología tradicional de valorización de un proyecto minero

Sin embargo, esta mirada tradicional, muchas veces nos induce a seleccionar reservas a partir de una sola ley de corte o con suerte dos o tres y de manera arbitraria. Por lo tanto, el plan minero asociado no necesariamente será el que represente el mejor negocio. En una etapa inicial de un proyecto, como una ingeniería de perfil, esta metodología es la más utilizada en la gran mayoría de los casos en la industria minera de Block Caving.

Para realizar un plan minero en un escenario de selección de reservas que se acerque al óptimo, se propone una metodología alternativa, como la indicada en la Figura 3-2. Es decir, incorporamos una cuarta etapa entre la selección de reservas y el plan minero, la que se denomina Hill of Value.

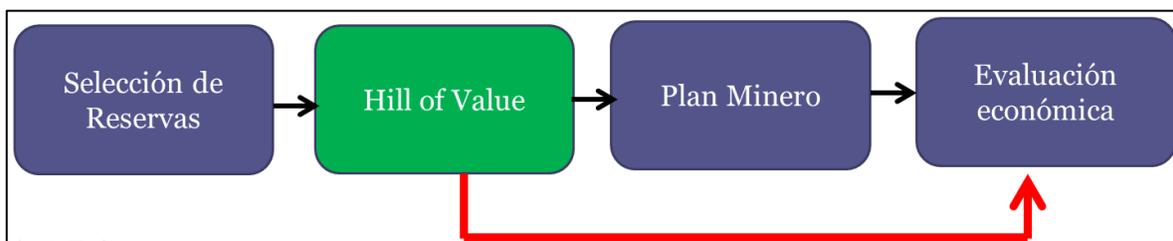


Figura 3-2: Metodología propuesta de valorización de un proyecto minero

Hill of Value es una metodología que fue presentada en el capítulo 2.8, que nos permite tener una primera aproximación de la selección de reservas que optimiza el VAN. A partir de esta aproximación, podemos tomar 2 caminos:

- Se finaliza el ejercicio contando con una estimación inicial del VAN.
 - Ventaja: este ejercicio se puede realizar en un tiempo muchísimo menor al que toma preparar un plan minero.
 - Desventaja: El valor del VAN es solamente referencial, debido a que considera simplificaciones que influyen en su determinación.
- Se prepara el plan minero y posteriormente se realiza la evaluación económica en un escenario de selección de reservas más favorable.
 - Ventaja: Hill of Value nos permitirá utilizar una ley de corte o un rango de leyes para definir las reservas que entregan un mayor VAN.
 - Desventaja: la preparación de uno o varios planes mineros toma un tiempo considerable para su ejecución.

Al aplicar la metodología de Hill of Value, es necesario realizar los siguientes pasos secuenciales:

- a) Definición de parámetros técnico-económicos.
- b) Dilución de cada piso factible a ser el piso óptimo. En este estudio, se selecciona la metodología de Laubscher para dilución.
- c) Valorización de cada bloque de acuerdo a los parámetros económicos definidos.
- d) Selección de altura óptima por columna, considerando mínimos y máximos factibles.
- e) Cubicación de reservas seleccionadas para cada piso (tonelaje, área, altura de columna, leyes), sin considerar suavizamiento de columnas.
- f) Selección de piso y footprint que entrega el mayor VAN.
- g) Preparación gráfica de footprint para ver factibilidad de explotación por Block Caving.
 - I. En caso que exista más de un cuerpo a explotar, hay que dividir el modelo de bloques y analizar cada cuerpo por separado.
 - II. En caso de que existan muchos cuerpos aislados, muy probablemente no será aplicable un Block Caving, por lo que no se podrá realizar el ejercicio.

- h) Desde el paso b) al paso g), se valoriza a distintos precios del elemento de interés (cobre, oro, plata por ejemplo), partiendo por el marginal. La idea es utilizar precios menores al marginal (lo que se traduce en leyes de corte mayores). En este estudio se utilizan 15 precios diferentes.
- i) Se estima el VAN para cada ley de corte, considerando 30 ritmos de producción. Se selecciona el ritmo de producción que maximiza el VAN.
- j) Para las 15 leyes de corte se selecciona la que tiene el mayor VAN y las dos leyes de corte inmediatamente superiores para realizar el plan minero, de acuerdo a lo explicado en el capítulo 2.10.

3.2 Hill of Value Optimizado

Para obtener el Hill of Value Optimizado a partir de la metodología estándar de Hill of Value, se contempla incorporar las 5 simplificaciones señaladas en la Tabla 2-2, es decir, este Hill of Value Optimizado considera capacidad de producción variable en el tiempo, ley media variable, perfil de inversiones en el tiempo, footprint suavizado y recuperación minera menor al 100 %. Adicionalmente, la capacidad de producción variable toma en cuenta una incorporación de área variable, la que también es incluida en la optimización.

a) Capacidad de producción variable

La capacidad de producción variable es definida utilizando las fórmulas de Taylor (1986) a través de Ecuación 2-7 y Ecuación 2-8, lo que es descrito en capítulo 2.7.1.

Junto a lo anterior, es necesario definir algún criterio que permita establecer los tiempos de ramp-up, régimen y ramp-down. Para la mayoría de los casos, se considera un 20 % del tiempo en ramp-up, un 60 % del tiempo en régimen y un 20 % en ramp-down, aunque es necesario realizar ajustes en las condiciones de borde (ritmos de producción y reservas muy elevados o muy bajos). Se definen 450 perfiles productivos (30 ritmos de producción para 15 leyes de corte). Para limitar la capacidad productiva, se utiliza la Ecuación 2-6.

b) Ley media variable

No es algo sencillo estimar la ley media variable en el tiempo, sin conocer la distribución espacial de leyes del yacimiento. La simplificación que se utiliza es

considerar el último año en producción con la ley de corte correspondiente, el año en que la mina se encuentra en la mitad de su vida útil toma el valor de la ley media y además se consideran perfiles de leyes característicos de planes mineros de proyectos representativos de Block Caving. Obviamente, el fino mina total se mantiene constante, es decir, la suma de los tonelajes por las leyes para cada año es igual al tonelaje total por la ley media. De igual forma, se construyen 450 perfiles de leyes.

c) Inversiones distribuidas en el tiempo

Para la inversión mina, su distribución en el tiempo en la etapa de preproducción es de 3 %, 5 %, 7 %, 12 % y 23 % para los años -4, -3, -2, -1 y 0 respectivamente y el 50 % restante se distribuye de acuerdo a la vida de la mina. El año cero es justo el anterior al primer año productivo.

Para la inversión en planta e infraestructura, el 85 % es distribuido en la etapa de preproducción (15 %, 30 % y 40 % para los años -2, -1 y 0) y el 15 % restante en la etapa de producción (distribuido en 3 partes de 5 % cada una de acuerdo a la vida de la planta de procesos).

Estos porcentajes fueron obtenidos de varios proyectos de Block Caving que tienen una distribución similar de inversiones en el tiempo, que por motivos de confidencialidad, no pueden ser referenciados.

d) Footprint suavizado

El footprint matemático es aquel obtenido al aplicar una ley o beneficio de corte a la selección de reservas, que puede resultar en cuerpos no continuos o con zonas aisladas, ya que únicamente evalúa la conveniencia de extraer una columna considerando el beneficio económico. Posteriormente, para la preparación del plan minero, es necesario suavizar el footprint, para darle la continuidad esperada para un Block Caving (incorporando estéril y dejando de extraer mineral). Este footprint resultante lo llamaremos suavizado.

Mientras más continuo sea el footprint matemático, más similar será al suavizado, ya que se incluirá menos estéril y se dejará de extraer menos mineral. En caso de un footprint más discontinuo, sucede lo contrario. Considerando el estudio de

Ovalle & Vera (2014), se utiliza un valor promedio de 6 % de pérdida de mineral y 10 % de extracción de estéril al suavizar el footprint matemático.

e) Recuperación minera

La recuperación minera utilizada es del 90 %, de acuerdo a lo descrito en capítulo 2.7.1.

f) Incorporación de área

Se considera un incorporación de área agresiva los 2 primeros años para acortar el periodo de ramp-up y a partir del tercer año se mantiene una incorporación de área constante hasta aproximadamente el año en que comienza el ramp-down, pudiendo esto variar de acuerdo a la duración de los puntos de extracción, lo que dada una velocidad de extracción, dependerá de la altura de columna.

3.3 Análisis de Hill of Value Optimizado

El análisis de cada una de los 6 temas definidos en el capítulo 3.2 (a), b), c), d), e) y f) puede originar variadas líneas de investigación. En este sentido, las condiciones particulares de un determinado yacimiento, pueden entregar información más específica en cuanto a la recuperación minera o al perfil productivo que se requiere, entendiéndose por ejemplo, que una estrategia opuesta a la definida en cuanto a acelerar el ramp-up pudiera ser prolongarlo, con el objetivo de retrasar las inversiones. Por lo tanto, la metodología es muy fácilmente adaptable a nuevas definiciones, pero es necesario contar con ella para estimar el VAN a partir del Hill of Value Optimizado.

En etapas iniciales de un proyecto, muchas veces solo se cuenta con un modelo de bloques, la topografía y algunos ensayos de testigos eventualmente. Por lo tanto, las definiciones realizadas corresponden a un punto de partida cuando no se cuenta con mayor información, que es lo que sucede típicamente en una ingeniería de perfil o estudio para establecer un orden de magnitud en la definición del método de explotación o rango de ritmo de producción.

4 ANALISIS DE INFORMACIÓN A UTILIZAR

En este capítulo, se describe la información a utilizar durante el estudio, la que corresponde a:

- Modelo de bloques de Proyecto 1.
- Modelo de bloques de Proyecto 2.
- Inversiones y costos a utilizar, junto con la definición de parámetros técnico-económicos obtenidos de otros proyectos de Block Caving.

Se cuenta con 2 modelos de bloques de diferentes proyectos reales de Block Caving, los que han sido modificados principalmente en cuanto a sus coordenadas por motivos de confidencialidad de los mismos.

El primer modelo es utilizado para desarrollar la metodología de Hill of Value Optimizado a partir del Hill of Value base. El segundo modelo es utilizado para validar la nueva metodología Hill of Value Optimizado.

Por otra parte, se definen parámetros técnico-económicos y mineros, junto con inversiones y costos que son usados en la estimación del VAN de los ejercicios desarrollados, los que son estimados a partir de proyectos representativos de Block Caving.

Finalmente, se hacen explícitas las exclusiones, detallando lo que está fuera del alcance de este estudio.

4.1 Proyecto 1

Este proyecto corresponde a un yacimiento polimetálico masivo con mineralización de cobre, oro y plata. El cuerpo presenta características de hundibilidad, fragmentación, dimensiones y profundidad que hacen que el Block Caving sea el método de explotación que más se ajusta al yacimiento. Por temas de confidencialidad, no es posible explicitar gráficamente el modelo de bloques y detallar sus características básicas.

4.1.1 Modelo de bloques 1

El modelo de bloques 1 correspondiente al Proyecto 1, contiene las características geométricas que se resumen en la Tabla 4-1. En adelante, este modelo, será referenciado como MB1.

Tabla 4-1: Geometría del modelo de bloques 1

ITEM	X (este)	Y (norte)	Z (elevación)	Total
Coordenada mínima	0	0	0	
Coordenada máxima	2.500	1.950	2.505	
Tamaño de bloque	25	25	15	
Número de bloques	100	78	167	1.302.600

En la Tabla 4-2 se aprecia que el yacimiento tiene una ley media de cobre, oro y plata de 0,38 %, 0,15 ppm y 1,37 ppm respectivamente.

Tabla 4-2: Leyes de Cu, Au y Ag de modelo de bloques 1

ITEM	Cu (%)	Au (ppm)	Ag (ppm)
Ley media	0,38	0,15	1,37

4.1.2 Precio de los metales, costos de venta y parámetros mineros

Para la evaluación de los diferentes escenarios se han considerado los precios y costos de ventas señalados en la Tabla 4-3. Estos valores corresponden a los utilizados en la evaluación económica del proyecto asociado y están dentro de lo esperable en el mercado en los próximos años.

Tabla 4-3: Precio y costo de venta de los metales, Proyecto 1

Metal	Precio	Costo de venta	Unidad
Cobre	3,00	0,359	USD/lb
Oro	1.300	5,0	USD/oz
Plata	23	0,40	USD/oz

Los parámetros mineros de la Tabla 4-4, complementan la información necesaria para ser utilizados en este estudio y son válidos para el Proyecto 1 y Proyecto 2.

Tabla 4-4: Parámetros mineros, Proyectos 1 y 2

Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
Punto de entrada de dilución	50	m	Modelo de Laubscher
Mínima altura de extracción	90	m	Para producir el caving
Máxima altura de extracción	1000	m	Posible con preacondicionamiento
Días por año	360	d/año	
Tasa de descuento	10	%	

4.1.3 Ley de cobre equivalente

Para efectos de simplificar las estimaciones, se incorpora el uso de una ley de cobre equivalente, que incorpora los beneficios de las leyes de oro y plata. Por lo tanto, el objetivo es caracterizar cada bloque por su ley de cobre equivalente, variable que permite determinar la decisión de su posible incorporación a las reservas mineras.

Los parámetros necesarios para determinar la ley de cobre equivalente son:

- Recuperaciones metalúrgicas de Cu, Au y Ag que para el caso particular de este yacimiento, se identifican 3 zonas metalúrgicas con distintas recuperaciones de acuerdo a:
 - Zona superior: entre la superficie y 250 m de profundidad aproximadamente.
 - Zona intermedia: entre los 250 m y 600 m de profundidad aproximadamente.
 - Zona inferior: bajo los 600 m de profundidad.

Para cada una de estas zonas, las recuperaciones metalúrgicas se obtienen por pruebas de laboratorio y se detallan en Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Recuperación metalúrgica por zonas, Proyecto 1

Zona	Recuperación global		
	Cu (%)	Au (%)	Ag (%)
Superior	83,1	72,8	31,0
Intermedia	90,2	80,3	54,9
Inferior	93,1	82,5	70,4

- Precio y costo de venta de Cu, Au y Ag, los que fueron detallados en Tabla 4-3.

Por lo tanto, a partir de las recuperaciones metalúrgicas, precios y costos de venta de Cu, Au y Ag, la ley de cobre equivalente, para cada zona, queda definida por la Ecuación 4-1, Ecuación 4-2 y Ecuación 4-3.

$$CuEq = Cu + 0,6264 * Au + 0,0047 * Ag$$

Ecuación 4-1: Ley de cobre equivalente, zona superior, Proyecto 1

$$CuEq = Cu + 0,6366 * Au + 0,0077 * Ag$$

Ecuación 4-2: Ley de cobre equivalente, zona intermedia, Proyecto 1

$$CuEq = Cu + 0,6337 * Au + 0,0096 * Ag$$

Ecuación 4-3: Ley de cobre equivalente, zona inferior, Proyecto 1

Dónde:

$CuEq$ = ley de cobre equivalente (%).

Cu = ley de cobre (%).

Au = ley de oro (ppm).

Ag = ley de plata (ppm).

4.2 Proyecto 2

Este proyecto corresponde a un yacimiento polimetálico masivo con mineralización de zinc, plomo y plata. El cuerpo presenta características de hundibilidad, fragmentación, dimensiones y profundidad que hacen que el Block Caving sea el método de explotación que más se ajusta al yacimiento. No obstante, no se puede descartar la aplicación de un Sublevel Caving o Sublevel Stopping con el objetivo de mejorar la selectividad, ya que este cuerpo es menos continuo en comparación al del Proyecto 1, en el sentido de que sus leyes presentan una mayor dispersión espacial. El análisis detallado de seleccionar el mejor método de explotación escapa al alcance de este trabajo, el cual se centra únicamente en Block Caving, que es el método seleccionado en este proyecto.

4.2.1 Modelo de bloques 2

El modelo de bloques 2 contiene las características geométricas que se resumen en la Tabla 4-6. En adelante, este modelo, será referenciado como MB2.

Tabla 4-6: Geometría del modelo de bloques 2

ITEM	X (este)	Y (norte)	Z (elevación)	Total
Coordenada mínima	2.000	2.000	0	
Coordenada máxima	4.540	4.260	1.980	
Tamaño de bloque	20	20	20	
Número de bloques	128	114	100	1.459.200

En la Tabla 4-7 se aprecia que el yacimiento tiene una ley media de zinc, plomo y plata de 1,36 %, 0,40 % y 9,6 ppm respectivamente.

Tabla 4-7: Estadísticas básicas del modelo de bloques 2

ITEM	Zn		Pb		Ag	
Cantidad de bloques	268.925		300.589		267.905	
Ley media (%)	1,36	(%)	0,40	(%)	9,6	(ppm)
Ley mínima	0,05	(%)	0,01	(%)	0,15	(ppm)
Ley máxima	38,05	(%)	10,71	(%)	443,06	(ppm)
Desviación estándar	1,73		0,48		9,94	
Coef. de variación	1,15		1,22		0,92	

4.2.2 Precio de los metales, costos de venta y parámetros mineros

Para la evaluación de los diferentes escenarios se han considerado los precios y costos de ventas señalados en la Tabla 4-8. Estos valores están dentro de lo esperable en el mercado en los próximos años.

Tabla 4-8: Precio y costo de venta de los metales

Metal	Precio	Costo de venta	Unidad
Zinc	1,22	0,33	USD/lb
Plomo	2,5	0,22	USD/kg
Plata	23	0,40	USD/oz

En cuanto a los parámetros mineros, se utilizan los definidos en la Tabla 4-4.

4.2.3 Ley de zinc equivalente

De la misma forma a lo explicado para el Proyecto 1, se incorpora el uso de la ley de zinc equivalente, que incorporara los beneficios del plomo y la plata.

Los parámetros necesarios para determinar la ley de zinc equivalente son:

- Recuperaciones metalúrgicas para Zn, Pb y Ag, indicadas en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Recuperación metalúrgica, Proyecto 2

ITEM	Zn (%)	Pb (%)	Ag (%)
Recuperación metalúrgica	90	85	70

- Precio y costo de venta de Zn, Pb y Ag, los que fueron detallados en Tabla 4-8.

Por lo tanto, a partir de las recuperaciones metalúrgicas, precios y costos de venta de Zn, Pb y Ag, la ley de zinc equivalente queda definida por la Ecuación 4-4.

$$ZnEq = Zn + 0,8748 * Pb + 204 * Ag / 10.000$$

Ecuación 4-4: Ley de zinc equivalente, Proyecto 2

Dónde:

ZnEq = ley de zinc equivalente (%).

Zn = ley de zinc (%).

Pb = ley de plomo (%).

Ag = ley de plata (ppm).

4.3 Costos e inversiones

Para la estimación del VAN a través del Hill of Value Optimizado es necesario contar con alguna metodología que permita estimar los costos e inversiones de la mina, planta e infraestructura, para lo cual se recurrió a información real de grandes proyectos de Block Caving, lo que será explicado a continuación.

4.3.1 Inversión y costo de planta de procesos e infraestructura

- Inversión de planta de procesos e infraestructura

El Gráfico 4-1 resume diferentes casos de estudios de capacidades de tratamiento en términos de las inversiones asociadas para 3 proyectos. Basado en esta información, para una planta de procesos de 100 kt/d se tiene una inversión aproximada de 30 kUSD por t/d de capacidad de proceso.

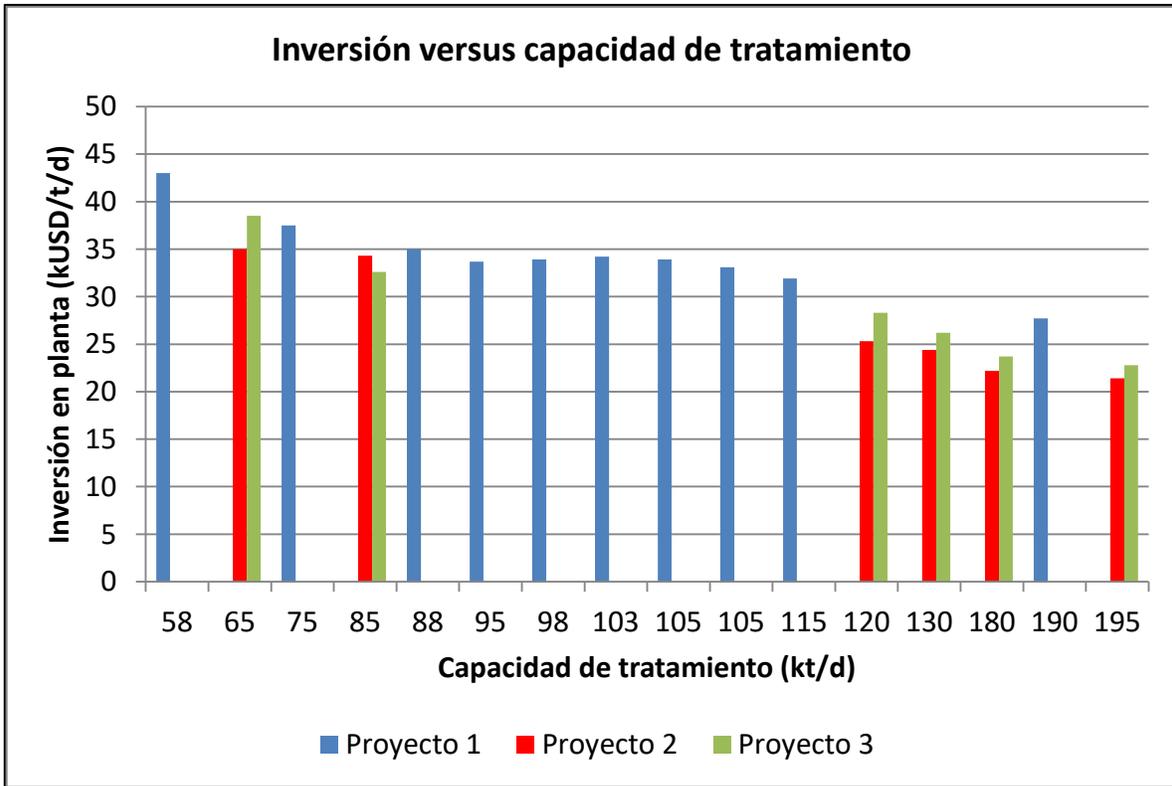


Gráfico 4-1: Inversión versus capacidad de tratamiento de plantas e infraestructura

En base a lo expuesto, se estima una inversión promedio de 3.000 MUSD, asumiendo una planta de 100 kt/d, incluyendo la infraestructura asociada. Para plantas de otras capacidades, la regla de los seis decimos es utilizada, de acuerdo a la Ecuación 4-5:

$$I_{P\&I} = \left(\frac{t/d}{100.000} \right)^{0,6} * 3.000$$

Ecuación 4-5: Inversión de planta de procesos e infraestructura asociada

Dónde:

$I_{P\&I}$ = inversión de planta de procesos e infraestructura asociada (MUSD).

t/d = capacidad de proceso por día.

- Costo de planta de procesos

Con respecto al costo de operación, un análisis similar para los proyectos 1, 2 y 3 concluye que para una planta del mismo tamaño (100 kt/d), el costo de procesamiento es de aproximadamente 7,4 USD/t, incluyendo el transporte del concentrado y relave. Para otras capacidades de procesamiento, se escala el costo considerando un 90 % variable y un 10 % fijo, de acuerdo a estructura de desagregación de costos típica de una planta de procesos de gran capacidad.

4.3.2 Inversión y costo mina

- Inversión mina

La evidencia empírica indica que la inversión inicial es una función directa del ritmo de producción de la mina, en términos de t/d y la inversión en la etapa productiva es directamente proporcional al total de reservas mineras en la vida de la mina, lo que es explicado a través de la Ecuación 4-6 (Vera & Ovalle, 2014). Esta relación empírica es usada principalmente en estudios de perfil y prefactibilidad y permite tener una estimación inicial de la inversión mina para Block Caving.

$$Inversión\ Mina = 9.000 \frac{USD}{t/d} * A + 0,3 \frac{USD}{t} * B$$

Ecuación 4-6: Inversión mina para Block Caving

Dónde:

- A = ritmo de producción (t/d).
 B = reservas mineras (t).

- Costo mina

Considerando 6 grandes proyectos de Block Caving en el mundo, se calcula el costo mina, sin incluir la preparación minera, lo que se detalla en Gráfico 4-2.

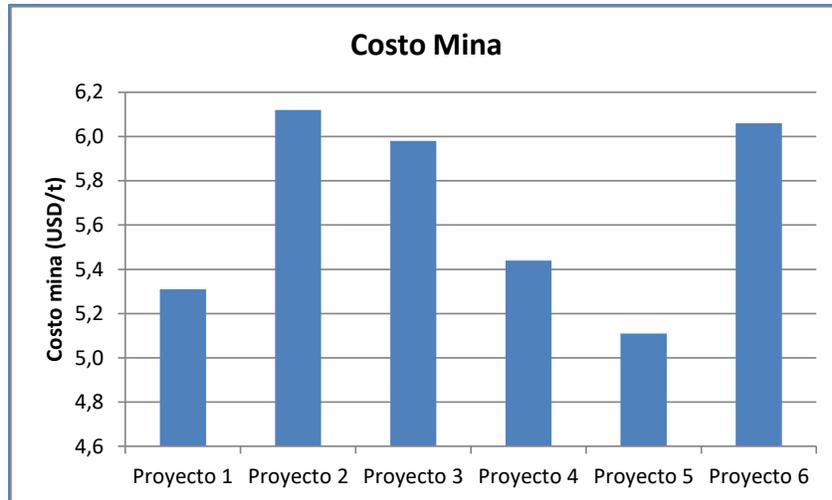


Gráfico 4-2: Costo mina de diferentes proyectos de Block Caving

Para los mismos 6 proyectos, se calcula el costo de la preparación minera, indicado en Gráfico 4-3.

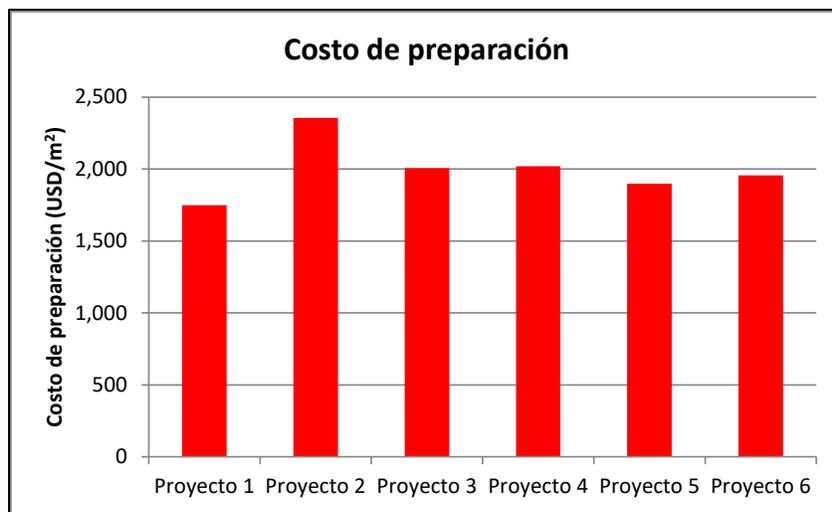


Gráfico 4-3: Costo de preparación de diferentes proyectos de Block Caving

A partir de Gráfico 4-2 y Gráfico 4-3, para este estudio se considera lo siguiente:

- Costo mina de 5,67 USD/t, el cual incluye extracción, servicios minas, G&A de la mina y costos de infraestructura mina.
- Costo de preparación minera de 2.000 USD/m² a toda el área del footprint del Block Caving.

4.4 Exclusiones

Con el objetivo de clarificar en forma explícita los aspectos que no son considerados en este estudio, se presentan a continuación las exclusiones:

- Impuestos.
- Royalties y licencias.
- Costos financieros.
- Estudios medioambientales y costos de mitigación.
- Costos hundidos.
- Cambio en la estrategia de consumo de reservas, entendiendo que el enfoque del estudio se enmarca en una visión de planificación de largo plazo.

5 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A ESTUDIAR

5.1 Etapas de metodología propuesta de valorización de un proyecto minero

Previamente a definir los escenarios a estudiar, se explican brevemente las etapas de la metodología propuesta de valorización de un proyecto minero:

- Selección de reservas: Para cada una de las 15 diferentes leyes de corte, se seleccionan las toneladas que maximizan el VAN, utilizando el algoritmo volumétrico de Laubscher para diluir las columnas de Block Caving y se selecciona la mejor elevación para el footprint, con sus correspondientes alturas de columna de extracción óptima.
- Hill of Value: Para cada una de las 15 leyes de corte de Cu, el VAN es estimado para diferentes años de duración de la mina o equivalentemente, para distintos ritmos de producción. Para ambos proyectos se utilizan 30 ritmos de producción para cada ley de corte. El ritmo de producción que tiene el más alto VAN es seleccionado.
- Hill of Value Optimizado: corresponde a realizar el ejercicio de Hill of Value anterior, considerando una optimización en la estimación del VAN, que se basa en tomar en cuenta la capacidad de producción variable en el tiempo, ley media variable, perfil de inversiones en el tiempo, footprint suavizado y recuperación minera menor al 100 %.
- Plan minero: consiste básicamente en realizar el suavizamiento de columnas, secuenciamiento, definir la incorporación de área, velocidades de extracción y simulación de la extracción, a partir de un tonelaje requerido por periodo. Todo lo mencionado se detalla en capítulo 2.9.
- Evaluación económica: se determina el VAN del proyecto, a partir del correspondiente flujo de caja, sin considerar impuestos o descuentos por impurezas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se definen los escenarios a evaluar.

5.2 Escenario Proyecto 1

Este escenario corresponde a realizar los siguientes ejercicios con el MB1:

- Selección de reservas para 15 leyes de corte de MB1 utilizando multiplicadores del precio: LC1, LC2,..., LC15.

- Plan minero con MB1 con ley de corte marginal LC1: PM1.
- Evaluación económica para PM1: EE1.
- Hill of Value para determinar las 3 leyes de corte óptima que maximizan el VAN evaluando las reservas para LC1, LC2,..., LC15: LCi, LCj, LCK.
- Plan minero con 3 leyes de corte óptimas LCi, LCj, LCK: PMi, PMj, PMk.
- Evaluación económica de PMi, PMj, PMk: EEi, EEj, EEk.
- Hill of Value Optimizado para determinar las 3 leyes de corte óptima que maximizan el VAN evaluando las reservas para LC1, LC2,..., LC15: LCr, LCs, LCt.
- Plan minero con 3 leyes de corte óptimas LCr, LCs, LCt: PMr, PMs, PMt.
- Evaluación económica de PMr, PMs, PMt: EEr, EEs, EEt.

Dónde:

LC1 = ley de corte 1 correspondiente a la ley de corte marginal, obtenida utilizando precio del cobre de 3 USD/lb.

LC2 = ley de corte 2 obtenida utilizando precio del cobre de 2,9 USD/lb.

LC3 = ley de corte 3 obtenida utilizando precio del cobre de 2,8 USD/lb.

LC4 = ley de corte 4 obtenida utilizando precio del cobre de 2,7 USD/lb.

LC5 = ley de corte 5 obtenida utilizando precio del cobre de 2,6 USD/lb.

LC6 = ley de corte 6 obtenida utilizando precio del cobre de 2,5 USD/lb.

LC7 = ley de corte 7 obtenida utilizando precio del cobre de 2,4 USD/lb.

LC8 = ley de corte 8 obtenida utilizando precio del cobre de 2,3 USD/lb.

LC9 = ley de corte 9 obtenida utilizando precio del cobre de 2,2 USD/lb.

LC10 = ley de corte 10 obtenida utilizando precio del cobre de 2,1 USD/lb.

LC11 = ley de corte 11 obtenida utilizando precio del cobre de 2,0 USD/lb.

LC12 = ley de corte 12 obtenida utilizando precio del cobre de 1,9 USD/lb.

LC13 = ley de corte 13 obtenida utilizando precio del cobre de 1,8 USD/lb.

LC14 = ley de corte 14 obtenida utilizando precio del cobre de 1,7 USD/lb.

LC15 = ley de corte 15 obtenida utilizando precio del cobre de 1,6 USD/lb.

PM1 = plan minero 1 utilizando ley de corte LC1.

EE1 = evaluación económica utilizando plan minero PM1.

LCi = ley de corte i obtenida utilizando precio del cobre Pi.

PMi = plan minero i utilizando ley de corte LCi.

EEi = evaluación económica utilizando plan minero PMi.

5.3 Escenario Proyecto 2

Este escenario corresponde a realizar los siguientes ejercicios con el MB2:

- Selección de reservas para 15 leyes de corte de MB2: LC1, LC2,..., LC15.
- Plan minero con MB2 con ley de corte marginal LC1: PM1.
- Evaluación económica para PM1: EE1.
- Hill of Value Optimizado para determinar las 3 leyes de corte óptima que maximizan el VAN evaluando las reservas para LC1, LC2,..., LC15: LCr, LCs, LCt.
- Plan minero con 3 leyes de corte óptimas LCr, LCs, LCt: PMr, PMs, PMt
- Evaluación económica de PMr, PMs, PMt: EEr, EEs, EEt.

Dónde:

LC1 = ley de corte 1 correspondiente a la ley de corte marginal, obtenida utilizando el precio del zinc de 1,22 USD/lb.

LC2 = ley de corte 2 obtenida utilizando precio del zinc de 1,19 USD/lb.

LC3 = ley de corte 3 obtenida utilizando precio del zinc de 1,16 USD/lb.

LC4 = ley de corte 4 obtenida utilizando precio del zinc de 1,13 USD/lb.

LC5 = ley de corte 5 obtenida utilizando precio del zinc de 1,10 USD/lb.

LC6 = ley de corte 6 obtenida utilizando precio del zinc de 1,07 USD/lb.

LC7 = ley de corte 7 obtenida utilizando precio del zinc de 1,04 USD/lb.

LC8 = ley de corte 8 obtenida utilizando precio del zinc de 1,01 USD/lb.

LC9 = ley de corte 9 obtenida utilizando precio del zinc de 0,98 USD/lb.

LC10 = ley de corte 10 obtenida utilizando precio del zinc de 0,95 USD/lb.

LC11 = ley de corte 11 obtenida utilizando precio del zinc de 0,92 USD/lb.

LC12 = ley de corte 12 obtenida utilizando precio del zinc de 0,89 USD/lb.

LC13 = ley de corte 13 obtenida utilizando precio del zinc de 0,86 USD/lb.

LC14 = ley de corte 14 obtenida utilizando precio del zinc de 0,83 USD/lb.

LC15 = ley de corte 15 obtenida utilizando precio del zinc de 0,80 USD/lb.

PM1 = plan minero 1 utilizando ley de corte LC1.

EE1 = evaluación económica utilizando plan minero PM1.

LCi = ley de corte i obtenida utilizando precio del zinc Pi.

PMi = plan minero i utilizando ley de corte LCi.

EEi = evaluación económica utilizando plan minero PMi.

En este escenario se incluye solamente la metodología de Hill of Value Optimizada, ya que entrega resultados más precisos con respecto a la metodología de Hill of Value, por la forma en que fue desarrollada.

Para la preparación de los planes mineros se utiliza el software Block Cave 2, que fue autorizado específicamente para el desarrollo de esta Tesis por su creador David Carkeet. Este software de planificación minera permite evaluar un proyecto de Block Caving bajo una óptica de largo plazo.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Proyecto 1

6.1.1 Selección de reservas

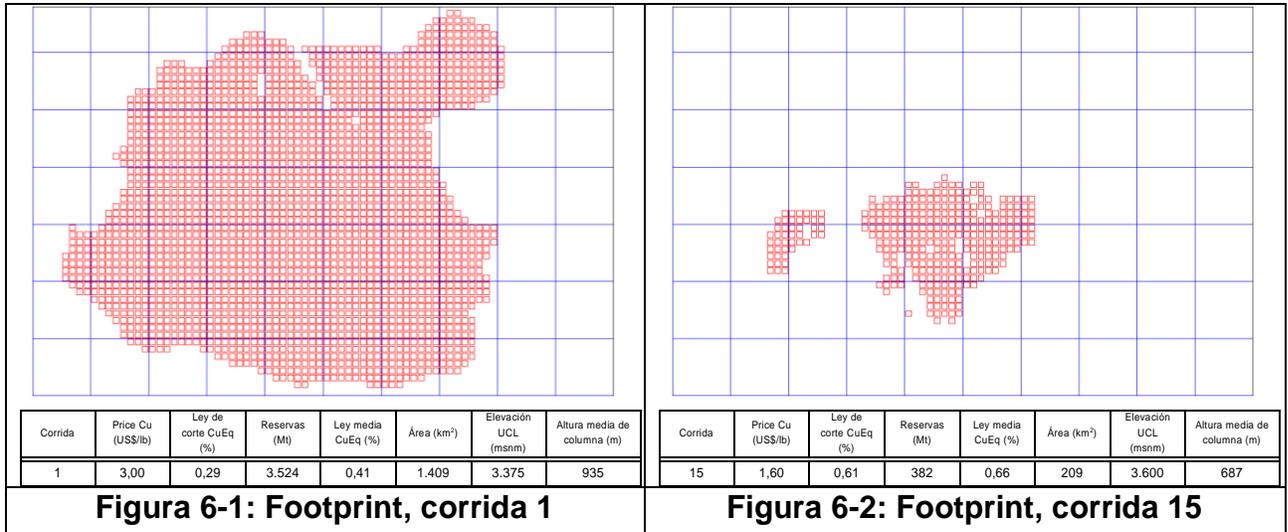
Para la selección de reservas, son aplicadas diferentes leyes de corte de cobre equivalente, para distintos precios del metal, desde uno muy alto (baja ley de corte), hasta uno muy bajo (alta ley de corte). Los resultados principales de este ejercicio de detallan en Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Selección de reservas para leyes de corte de CuEq, Proyecto 1

Corrida	Precio Cu (USD/lb)	Ley de corte de CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (m ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
1	3,00	0,29	3.524	0,41	1.409.375	3.375	935
2	2,90	0,30	3.327	0,42	1.375.625	3.390	904
3	2,80	0,31	3.259	0,43	1.333.750	3.390	890
4	2,70	0,32	2.962	0,44	1.283.750	3.405	863
5	2,60	0,34	2.768	0,45	1.203.750	3.405	861
6	2,50	0,35	2.570	0,45	1.125.000	3.405	855
7	2,40	0,37	2.357	0,47	1.065.000	3.420	829
8	2,30	0,39	2.145	0,48	987.500	3.420	814
9	2,20	0,41	1.875	0,49	905.000	3.435	777
10	2,10	0,44	1.589	0,51	788.750	3.435	756
11	2,00	0,46	1.227	0,54	591.875	3.465	778
12	1,90	0,49	1.024	0,56	501.875	3.480	765
13	1,80	0,53	715	0,60	354.375	3.540	757
14	1,70	0,57	531	0,63	266.875	3.555	747
15	1,60	0,61	382	0,66	208.750	3.600	687

Cada una estas 15 corridas, representa minas de tamaños muy disimiles. Si comparamos el caso extremo de la corrida 1 y corrida 15, las reservas seleccionadas son de 3.524 Mt y 382 Mt respectivamente. La Figura 6-1 y Figura 6-2 representan el footprint de estas 2 minas con sus parámetros principales, donde la grilla de color azul es de 200 m x 200 m y los bloques de color rojo son de 25 m x 25 m.

En Anexo B se detallan cada uno de los 15 footprint resultantes para el Proyecto 1.



6.1.2 Hill of Value

El VAN resultante del Hill of Value es presentado en el Gráfico 6-1. Únicamente con la intención de simplificar su visualización, solo son presentados los valores de VAN positivos. El eje “x” indica la duración de la mina (relacionado al ritmo de producción), el eje “y” indica la corrida (relacionada con la ley de corte de cobre equivalente) y el eje “z” es el VAN.

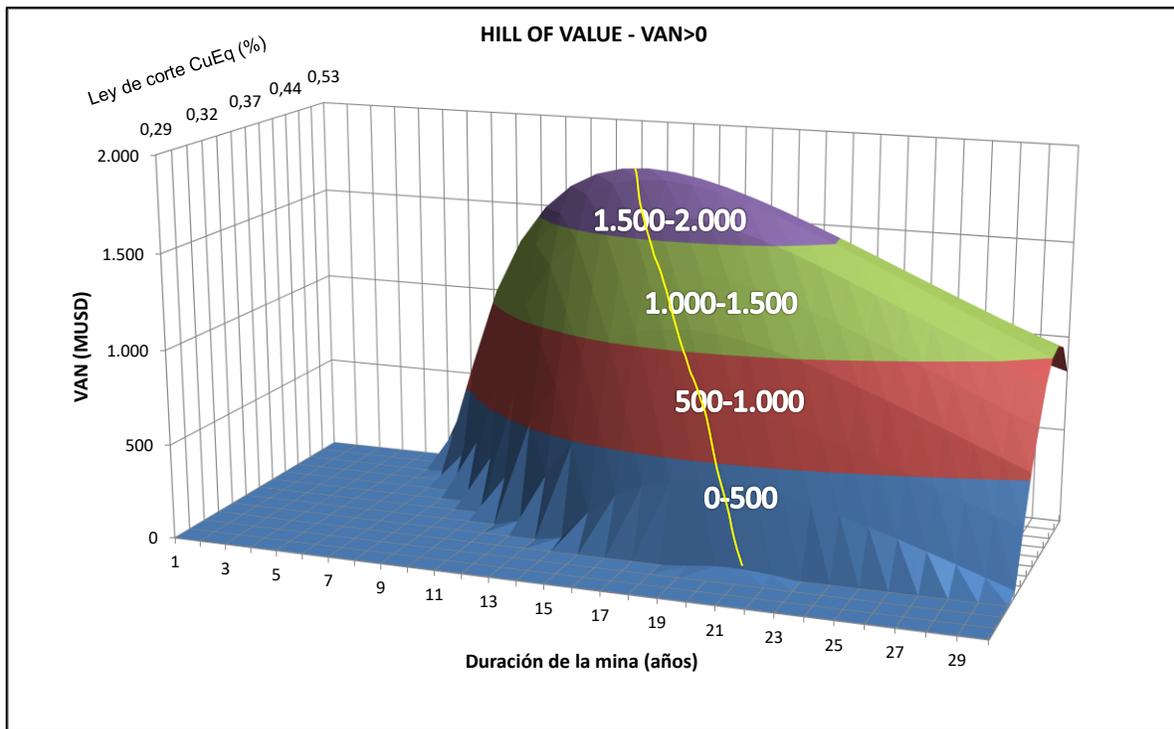


Gráfico 6-1: Hill of Value VAN > 0, Proyecto 1

La serie de color amarillo representa el máximo VAN para diferentes leyes de corte de cobre equivalente, considerando los ritmos de producción que maximizan el VAN. Se observa que para la ley de corte marginal de CuEq de 0,29 %, no existe ningún valor de VAN positivo.

El Gráfico 6-2 representa los valores máximos de VAN para cada una de las 15 leyes de corte indicadas en la Tabla 6-1, incluidos los valores negativos.

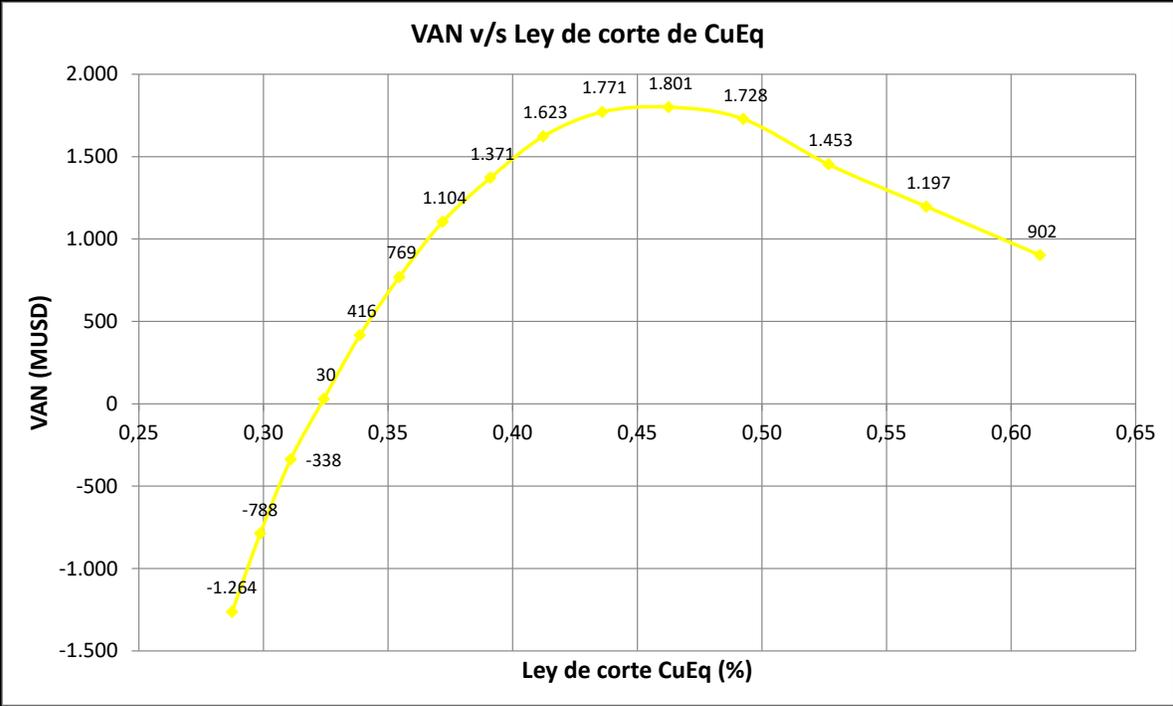


Gráfico 6-2: Mayor VAN para cada ley de corte de CuEq, Proyecto 1

La Tabla 6-2 detalla las características de cada uno de estos valores óptimos. Se han destacado en color verde las corridas que presentan un mayor VAN, utilizando el criterio mencionado en el capítulo 2.10 de considerar el VAN mayor y las 2 leyes de corte inmediatamente superiores.

Como ya ha sido mencionado, este VAN considera una serie de simplificaciones que nos permiten tener un orden de magnitud de la ley de corte que maximiza el VAN, pero no así su valor absoluto. Por ejemplo, los ritmos de producción resultantes son demasiado altos para un Block Caving, no obstante, esto se produce porque la metodología impone que desde el primer año en producción la mina se encuentra en régimen, lo que incentiva a tener ritmos de producción muy altos con el objetivo de maximizar el VAN.

Tabla 6-2: Valorización de reservas para leyes de corte de CuEq, Proyecto 1

Corrida	Precio Cu (USD/lb)	Ley de corte de CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Ritmo de producción (kt/d)	Duración de la mina (años)	VAN (MUSD)	IVAN
1	3,00	0,29	3.524	0,41	392	25	-1.264	-0,11
2	2,90	0,30	3.327	0,42	402	23	-788	-0,07
3	2,80	0,31	3.259	0,43	411	22	-338	-0,03
4	2,70	0,32	2.962	0,44	392	21	30	0,00
5	2,60	0,34	2.768	0,45	384	20	416	0,04
6	2,50	0,35	2.570	0,45	376	19	769	0,07
7	2,40	0,37	2.357	0,47	364	18	1.104	0,11
8	2,30	0,39	2.145	0,48	350	17	1.371	0,13
9	2,20	0,41	1.875	0,49	326	16	1.623	0,17
10	2,10	0,44	1.589	0,51	276	16	1.771	0,21
11	2,00	0,46	1.227	0,54	227	15	1.801	0,25
12	1,90	0,49	1.024	0,56	190	15	1.728	0,27
13	1,80	0,53	715	0,60	142	14	1.453	0,28
14	1,70	0,57	531	0,63	105	14	1.197	0,32
15	1,60	0,61	382	0,66	76	14	902	0,30

Por lo tanto, para estimar de mejor forma el VAN, se realiza el ejercicio de Hill of Value Optimizado.

6.1.3 Hill of Value Optimizado

Como fue explicado en el capítulo 3.2, el Hill of Value Optimizado considera supuestos que mejoran la estimación del VAN con respecto al Hill of Value, por lo que se aplica esta nueva metodología en el Proyecto 1.

El VAN resultante del Hill of Value Optimizado es presentado en el Gráfico 6-3. Únicamente con la intención de simplificar su visualización, solo son presentados los valores de VAN positivos. El eje “x” indica la duración de la mina (relacionado al ritmo de producción), el eje “y” indica la corrida (relacionada con la ley de corte de cobre equivalente) y el eje “z” es el VAN.

Se observa claramente la gran diferencia que existe en la estimación del VAN entre ambas metodologías, ya que en la tradicional el VAN alcanza máximos cercanos a los 2.000 MUSD aproximadamente (Gráfico 6-1) y en la optimizada el VAN llega a valores cercanos a 520 MUSD (Gráfico 6-3). Posteriormente, la preparación de los planes mineros en el entorno de las leyes que maximizan el VAN, ratificarán o rectificarán la estimación del VAN de ambas metodologías.

Si se compara el VAN resultante del Gráfico 6-1 (Hill of Value) y del Gráfico 6-3 (Hill of Value Optimizado), se observa que la primera superficie de VAN es más suave y no se observan quiebres como en la segunda. Esto sucede principalmente, porque la capacidad productiva en el Hill of Value es calculada considerando un ritmo de producción constante, en cambio en el Hill of Value Optimizado, el ritmo de producción es variable en el tiempo y considera periodos de ramp-up, régimen y ramp-down, por lo que la superficie de VAN tiene una forma más escalonada como se observa en el Gráfico 6-3.

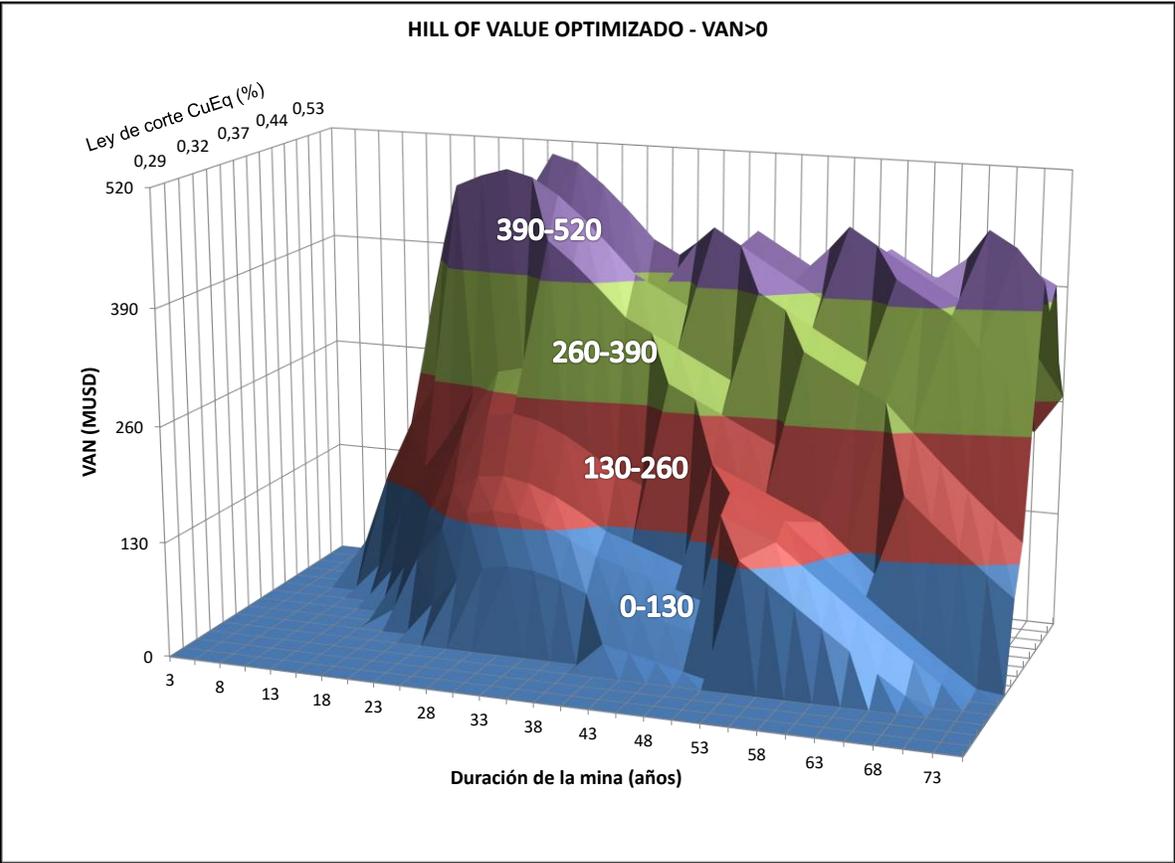


Gráfico 6-3: Hill of Value Optimizado VAN>0, Proyecto 1

Se observa que para la ley de corte marginal de CuEq de 0,29 %, no existe ningún valor de VAN positivo.

El Gráfico 6-4 representa los valores máximos de VAN para cada una de las 15 leyes de corte indicadas en la Tabla 6-1, incluidos los valores negativos. Se observa que las leyes de corte que maximizan el VAN son las mismas

determinadas por Hill of Value sin optimizar, vale decir las corridas 11, 12 y 13 con un VAN de 512, 452 y 507 MUSD respectivamente.

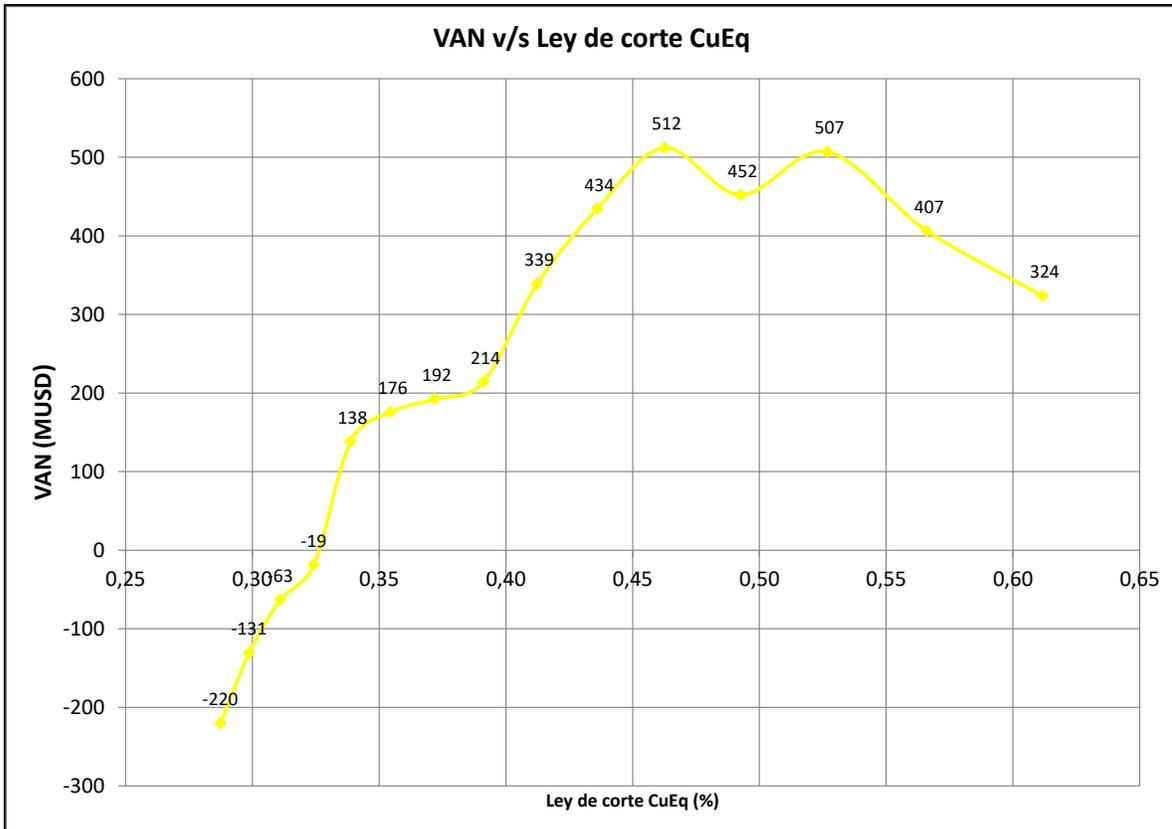


Gráfico 6-4: Mayor VAN optimizado para cada ley de corte de CuEq, Proyecto 1

La selección de reservas de esta metodología optimizada es la misma que para la metodología tradicional, es decir, la Tabla 6-2 y Tabla 6-4 son idénticas en sus columnas de precio Cu, ley de corte de CuEq, reservas y ley media CuEq. Sin embargo, se diferencian en los ítems indicados en la Tabla 6-3, debido a la diferente forma que estiman el VAN, como se menciona en el capítulo 3.2.

Tabla 6-3: Diferencias entre Hill of Value y Hill of Value Optimizado

ITEM	Hill of Value	Hill of Value Optimizado
Ritmo de producción	alto	bajo
Duración de la mina	baja	larga
VAN	alto	bajo
IVAN	alto	bajo

La Tabla 6-4 detalla las características de cada uno de estos valores óptimos. Se han destacado en color verde las corridas que presentan un mayor VAN.

Tabla 6-4: Valorización de reservas optimizada para leyes de CuEq, Proyecto 1

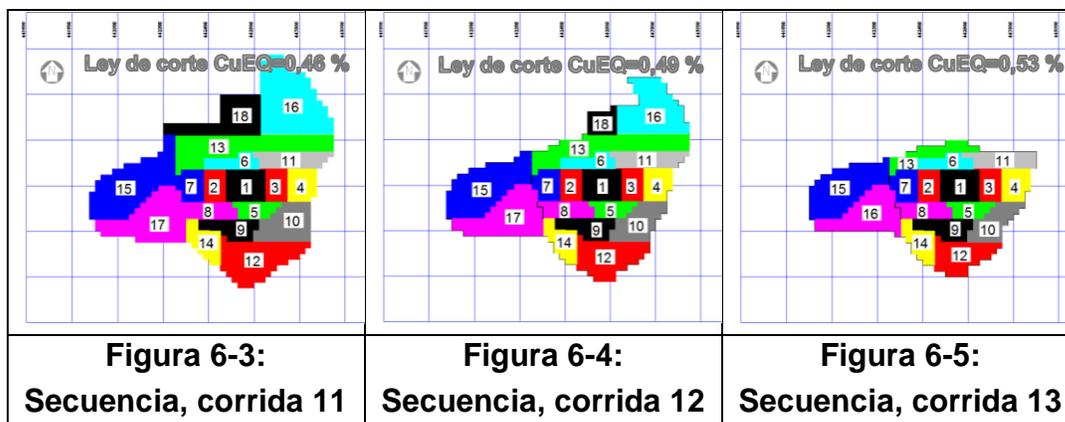
Corrida	Precio Cu (USD/lb)	Ley de corte de CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Ritmo de producción (kt/d)	Duración de la mina (años)	VAN (MUSD)	IVAN
1	3,00	0,29	3.524	0,41	220	50	-220	-0,03
2	2,90	0,30	3.327	0,42	217	48	-131	-0,02
3	2,80	0,31	3.259	0,43	213	48	-63	-0,01
4	2,70	0,32	2.962	0,44	203	46	-19	0,00
5	2,60	0,34	2.768	0,45	169	50	138	0,02
6	2,50	0,35	2.570	0,45	164	48	176	0,03
7	2,40	0,37	2.357	0,47	151	48	192	0,03
8	2,30	0,39	2.145	0,48	144	46	214	0,04
9	2,20	0,41	1.875	0,49	120	47	339	0,07
10	2,10	0,44	1.589	0,51	161	32	434	0,10
11	2,00	0,46	1.227	0,54	159	26	512	0,14
12	1,90	0,49	1.024	0,56	146	24	452	0,14
13	1,80	0,53	715	0,60	97	24	507	0,17
14	1,70	0,57	531	0,63	80	22	407	0,17
15	1,60	0,61	382	0,66	47	25	324	0,16

Aparentemente, la metodología de Hill of Value Optimizado entrega resultados en ritmo de producción, duración de la mina y VAN más razonables, lo que es sujeto a verificación con los resultados de los planes mineros, descritos en el capítulo 6.1.4.

6.1.4 Plan minero

La preparación de los planes mineros se realiza para las corridas 11, 12 y 13 (leyes de corte de CuEq de 0,46 %; 0,49 % y 0,53 % respectivamente), las que son candidatas a óptimos de acuerdo al VAN estimado por Hill of Value Optimizado. La secuencia de las columnas se realiza privilegiando la extracción temprana de aquellas con un mayor beneficio por tonelada.

La Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5 representan la secuencia utilizada, la que ha sido simplificada para su visualización (como referencia, la grilla de color azul tiene un espaciamiento de 200 m x 200 m).



Por ejemplo, para el caso de la corrida 13, sus 601 columnas fueron secuenciadas, pero en la Figura 6-5 se realiza una agrupación de estas columnas en 16 zonas, solo para su mejor representación gráfica.

Se observa claramente que la zona de inicio de la extracción está ubicada en el centro del cuerpo, ya que en ella se encuentran las mayores leyes. La secuencia continúa hacia las zonas con menores leyes localizadas en la periferia.

Previo a este secuenciamiento, fue necesario darle continuidad al cuerpo a extraer, haciendo análisis del tipo costo-beneficio para grupos de columnas, para en algunos casos incluir estéril o dejar de extraer mineral. Por ejemplo, matemáticamente puede resultar beneficioso extraer 10 columnas alejadas del cuerpo principal, es decir, pueden tener leyes muy altas, pero para su extracción necesariamente se deben extraer otras 10 columnas de bajas leyes. ¿Resulta beneficioso extraer entonces estas 20 columnas o simplemente no se incorporan al cuerpo principal?. La respuesta depende de cada caso y este tipo de análisis se realizó para las corridas 11, 12 y 13. Es decir, el paso del footprint matemático al suavizado demanda una gran cantidad de análisis.

Para cada uno de estas 3 corridas, las reservas a extraer resultaron ser significativamente diferentes (1.227 Mt, 1.024 Mt y 715 Mt para leyes de corte de CuEq de 0,46 %; 0,49 % y 0,53 % respectivamente). Con el objetivo de hacer un análisis comparativo que no perjudique o beneficie a alguna de las 3 corridas, la preparación de los planes mineros considera lo siguiente:

- El ritmo de producción fue fijado en 70 kt/d, que fue obtenido de los estudios del proyecto original, considerando una línea de proceso SAG.

- Ramp-up idéntico, lo que se observa en la Gráfico 6-5.

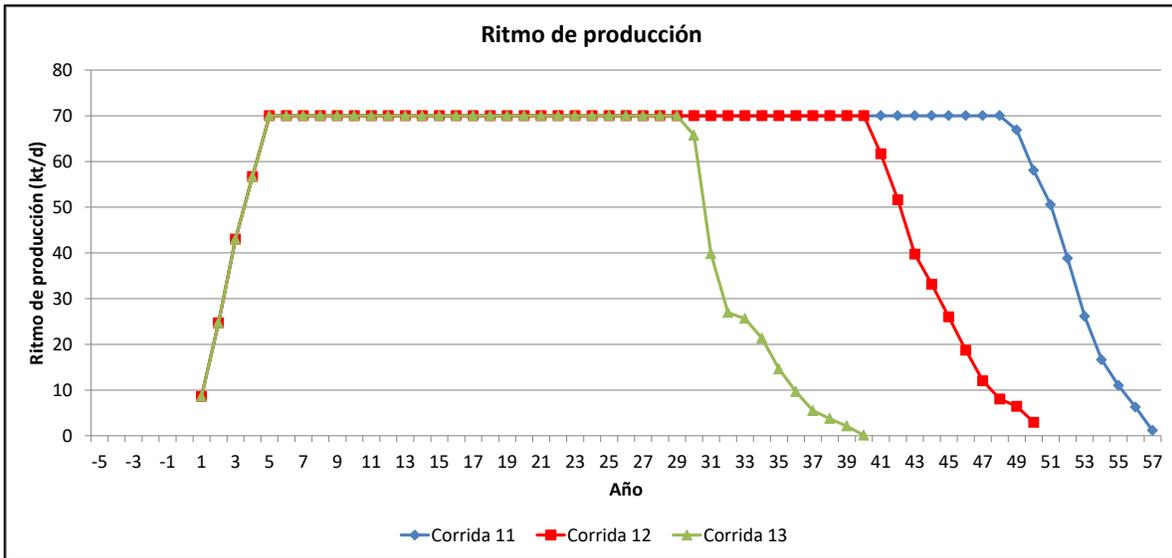


Gráfico 6-5: Ritmo de producción, Proyecto 1

El Gráfico 6-6 da cuenta del perfil de leyes de los 3 planes evaluados, donde destaca el hecho de que la corrida 13 tiene las mejores leyes en los primeros años, lo que impacta favorablemente el valor del VAN.

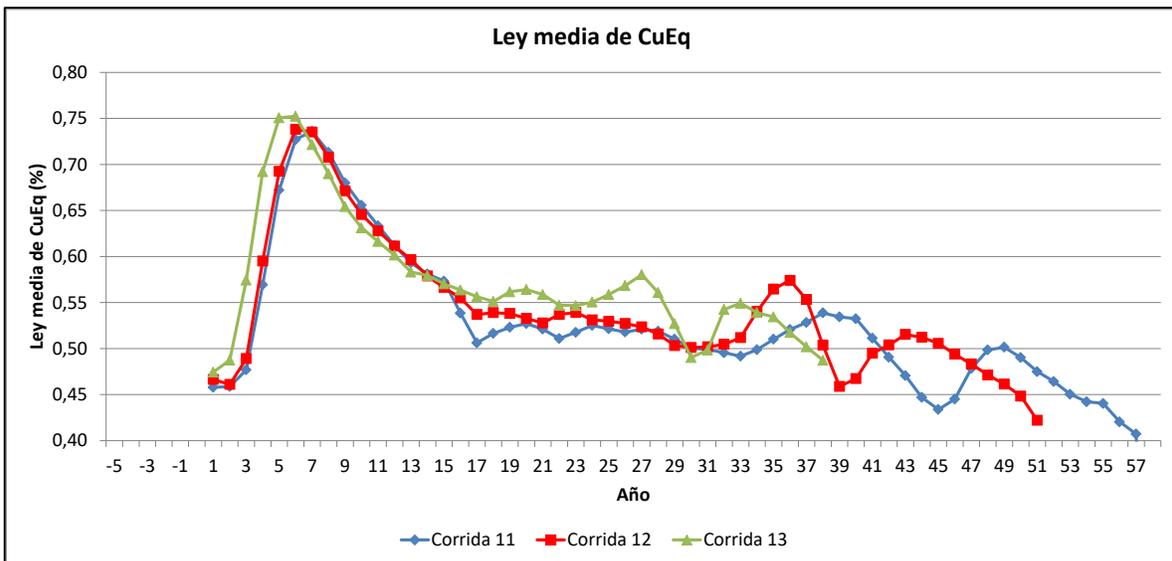


Gráfico 6-6: Ley media de CuEq, Proyecto 1

Por otra parte, cabe hacer notar que aproximadamente entre los años 6 y 7 se alcanza el valor máximo de las leyes. Esto se explica ya que existe una

concentración de leyes altas en la zona inicial de extracción, aproximadamente 250 m sobre el nivel de hundimiento. Después de estos primeros años, las leyes van decreciendo gradualmente.

Por otra parte, las leyes de la corrida 13 son mayores a las corridas 11 y 12 desde el año 1 al 6, lo que se explica por la cota del nivel de hundimiento. Estas cotas son 3.465, 3.480 y 3.540 msnm para las corridas 11, 12 y 13 respectivamente (ver Tabla 6-1), por lo que la selección de reservas de la corrida 13 accede más rápidamente a la concentración de leyes altas en alturas mencionada anteriormente.

El Gráfico 6-7 detalla la incorporación de área para los 3 planes mineros. Con el objetivo de acortar el periodo de ramp-up y así aumentar el VAN, la estrategia seguida fue incorporar una gran cantidad de área los 2 primeros años y posteriormente mantener una incorporación mínima de área prácticamente constante en el tiempo satisfaciendo los requerimientos de producción. Por lo tanto, además de acortar el periodo de ramp-up, se puede aprovechar de tener una fuerza de trabajo constante en la preparación minera.

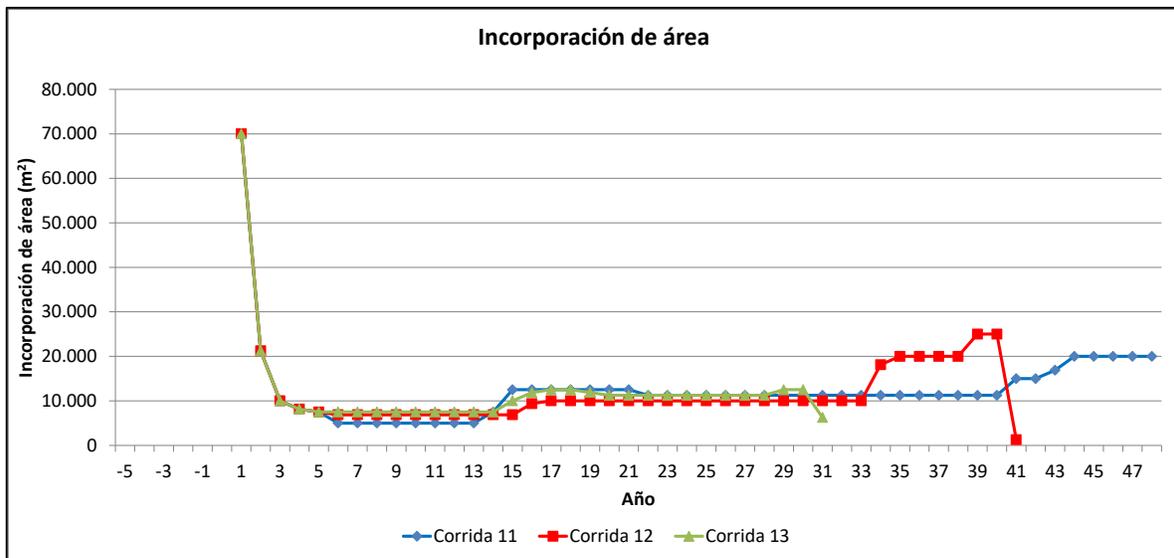


Gráfico 6-7: Incorporación de área, Proyecto 1

Se observa que las corridas 11 y 12 tienen una tasa de incorporación de área mayor en los últimos años, lo que se explica por el hecho de que en la periferia del cuerpo, las alturas económicas son más bajas y por lo tanto para mantener el requerimiento de producción, se debe incrementar la incorporación de área.

6.1.5 Evaluación económica

La evaluación económica considera las siguientes consideraciones y supuestos:

- Inversiones: planta e infraestructura (Ecuación 4-5) y mina (Ecuación 4-6).
- Costos:
 - 7,4 USD/t para la planta de proceso, escalado de acuerdo a lo mencionado en capítulo 4.3.1.
 - 5,67 USD/t para el costo de extracción mina y 2.000 USD/m² para la preparación minera, definidos en capítulo 4.3.2.
- Tasa de descuento del 10 %.
- No se considera la aplicación de impuestos.
- No se considera el descuento por impurezas.

El Gráfico 6-8 muestra los ingresos de cada una de las corridas evaluadas. La relación es directa con el Gráfico 6-6 (ley media de CuEq), en el sentido de que mayores leyes se reflejan en mayores ingresos y viceversa.

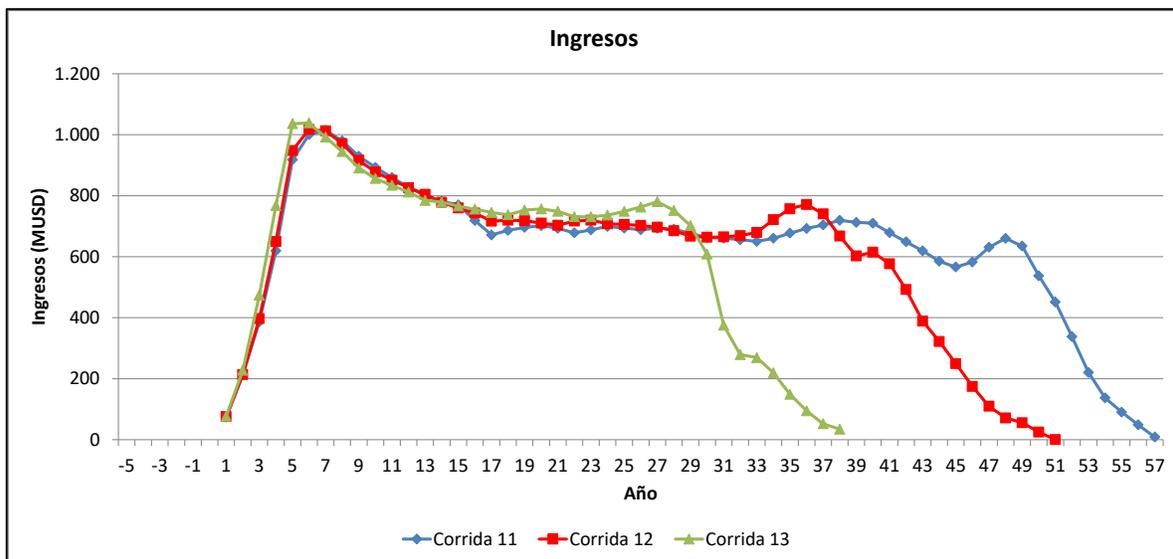


Gráfico 6-8: Ingresos, Proyecto 1

En Anexo C se detallan los gastos de operación, las inversiones y los flujos netos del Proyecto 1 (Figura C-1, Figura C-2 y Figura C-3 respectivamente).

Con el objetivo de asegurar que la selección de la ley de corte es la correcta, se realizan 2 planes mineros adicionales, utilizando leyes de corte inmediatamente

menores a la que entrega el mayor VAN de acuerdo al Hill of Value Optimizado: 0,41 y 0,44 %CuEq (corridas 9 y 10 respectivamente), las que estiman un VAN menor al de las otras corridas, de acuerdo al plan minero como se puede apreciar en la Tabla 6-5.

Adicionalmente, en la Tabla 6-5 se incluye la corrida 1 correspondiente a la estimada con la ley de corte marginal de 0,29 %CuEq.

Tabla 6-5: VAN estimado por Hill of Value y plan minero para corridas 1, 9, 10, 11, 12 y 13, Proyecto 1

Corrida	Ley de corte de CuEq (%)	Ritmo de producción (kt/d)	VAN Hill of Value (MUSD)	VAN Hill of Value Optimizado (MUSD)	VAN plan minero (MUSD)
1	0,29	70	-1.264	-220	-229
9	0,41	70	1.623	339	288
10	0,44	70	1.771	434	316
11	0,47	70	1.801	512	341
12	0,49	70	1.728	452	379
13	0,53	70	1.453	507	459

De la Tabla 6-5 se concluye lo siguiente:

- La corrida 1 correspondiente a la marginal, es considerablemente menos atractiva que las obtenidas con leyes de corte mayores.
- El VAN Hill of Value sobreestima el valor del proyecto (excepto en la corrida 1), de la misma forma en que fue establecido por el estudio de Vera y Ovalle (2014).
- El VAN Hill of Value Optimizado estima bastante bien el VAN del proyecto, entendiendo que el VAN del plan minero es el más confiable por definición.
- La corrida 13 es la alternativa más atractiva con un VAN de 459 MUSD, una ley media de 0,59 %CuEq y una ley de corte 0,53 %CuEq.

Las Corridas 14 y 15 no se incluyen en la evaluación, debido a que tienen leyes de corte bastante altas, lo que se materializa en cuerpos discontinuos, que únicamente permiten la aplicación de un Block Caving en un área muy reducida, lo que hace que no sean opciones competitivas comparadas con las de leyes de corte menores (Ver Anexo B, Figura B-14 y Figura B-15).

El plan minero de la corrida 13 se observa en el Gráfico 6-9. El valor máximo de la ley media se da entre los años 5 y 6, siendo el año 5 cuando se llega a régimen.

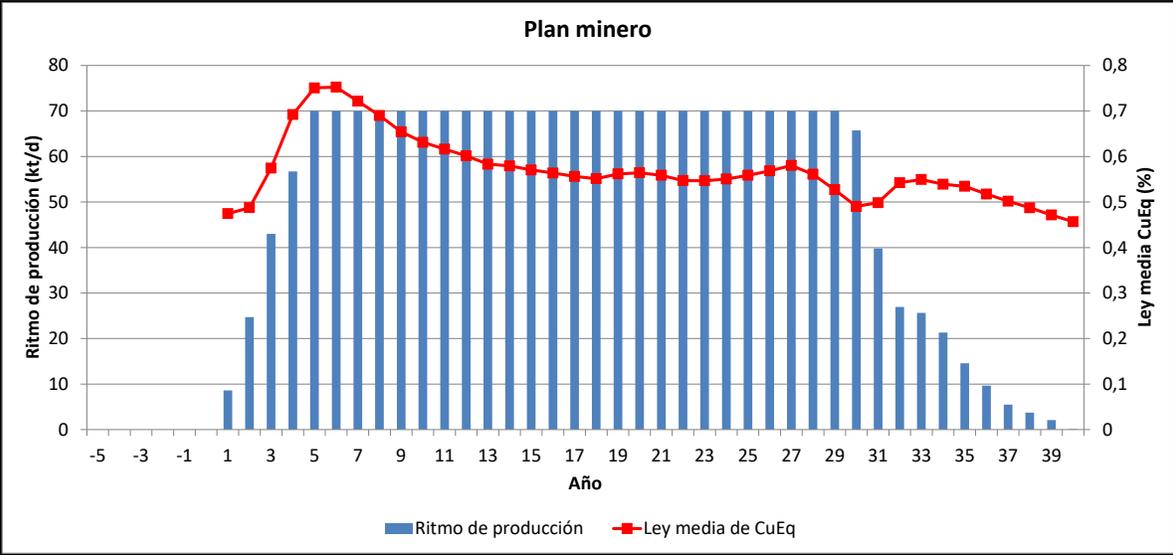


Gráfico 6-9: Plan minero corrida 13, Proyecto 1

6.2 Proyecto 2

Si bien los resultados del Hill of Value Optimizado son satisfactorios para el Proyecto 1, se aplica nuevamente esta metodología en el Proyecto 2 con la finalidad de validar sus resultados.

6.2.1 Selección de reservas

Para la selección de reservas, son aplicadas diferentes leyes de corte de zinc equivalente, para distintos precios del metal, desde uno muy alto (baja ley de corte), hasta uno muy bajo (alta ley de corte). Los resultados principales de este ejercicio de detallan en Tabla 6-6.

Tabla 6-6: Selección de reservas para leyes de corte de ZnEq, Proyecto 2

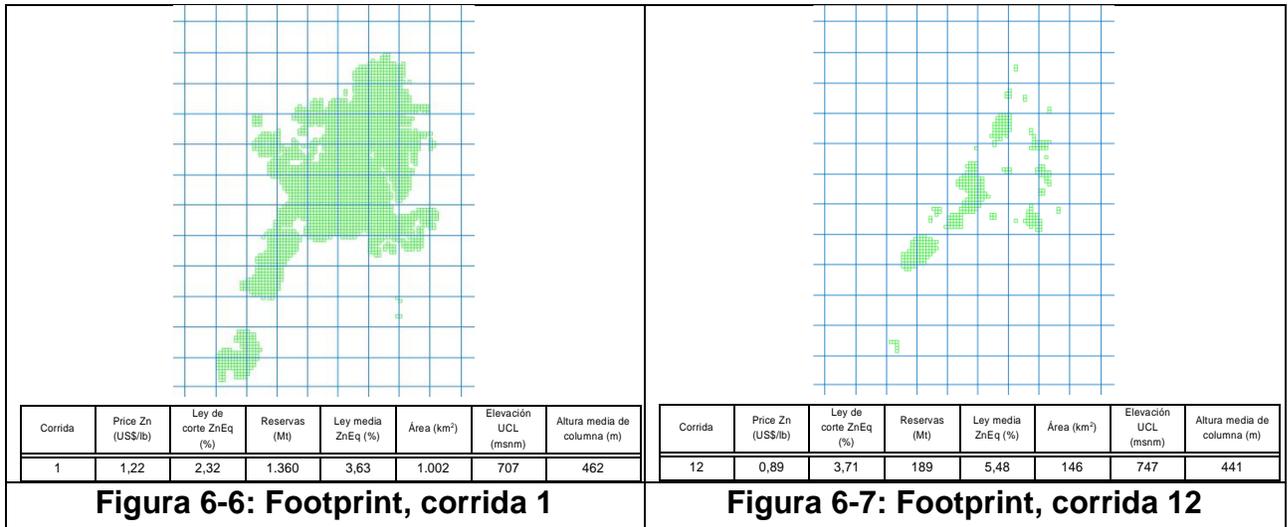
Corrida	Precio Zn (USD/lb)	Ley de corte de ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (m ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
1	1,22	2,32	1.360	3,63	1.002.400	707	462
2	1,19	2,38	1.323	3,67	978.000	707	461
3	1,16	2,44	1.286	3,71	948.000	707	462
4	1,13	2,52	1.244	3,75	915.200	707	463
5	1,10	2,60	1.184	3,81	868.800	707	464
6	1,07	2,69	1.092	3,91	799.200	707	465
7	1,04	2,80	977	4,02	712.400	707	467
8	1,01	2,93	861	4,16	618.000	707	470
9	0,98	3,07	668	4,41	492.000	727	462
10	0,95	3,24	526	4,63	385.600	727	459
11	0,92	3,45	344	4,97	256.400	727	456
12	0,89	3,71	189	5,48	145.600	747	441
13	0,86	4,03	90	6,11	70.800	747	429
14	0,83	4,44	31	7,00	25.600	727	408
15	0,80	5,00	6	8,06	5.200	767	368

Para este ejercicio en particular, las corridas 13, 14 y 15 se descartan por el hecho de conformar un yacimiento de dimensiones muy pequeñas y con cuerpos muy aislados, considerando una explotación de Block Caving.

Las conclusiones de esta etapa son las mismas que para el Proyecto 1, es decir, hay una gran variabilidad de tamaños de mina factible, desde una con 1.360 Mt y

otra con 189 Mt de reservas o en términos de footprint desde 1.002.400 m² a 145.600 m².

La Figura 6-6 y Figura 6-7 representan el footprint de estas 2 últimas minas potenciales con sus parámetros principales, donde la grilla de color azul es de 200 m x 200 m y los bloques de color verde son de 20 m x 20 m.



En Anexo D se detallan cada uno de los 15 footprint resultantes para el Proyecto 2.

6.2.2 Hill of Value

En este proyecto se decide no utilizar esta metodología, debido a que por construcción, la metodología Hill of Value Optimizada estima valores de VAN más cercanos al óptimo.

6.2.3 Hill of Value Optimizado

El VAN resultante del Hill of Value Optimizado es presentado en el Gráfico 6-10. Únicamente con la intención de simplificar su visualización, solo son presentados los valores de VAN positivos. El eje “x” indica la duración de la mina (relacionado al ritmo de producción), el eje “y” indica la corrida (relacionada con la ley de corte de zinc equivalente) y el eje “z” es el VAN.

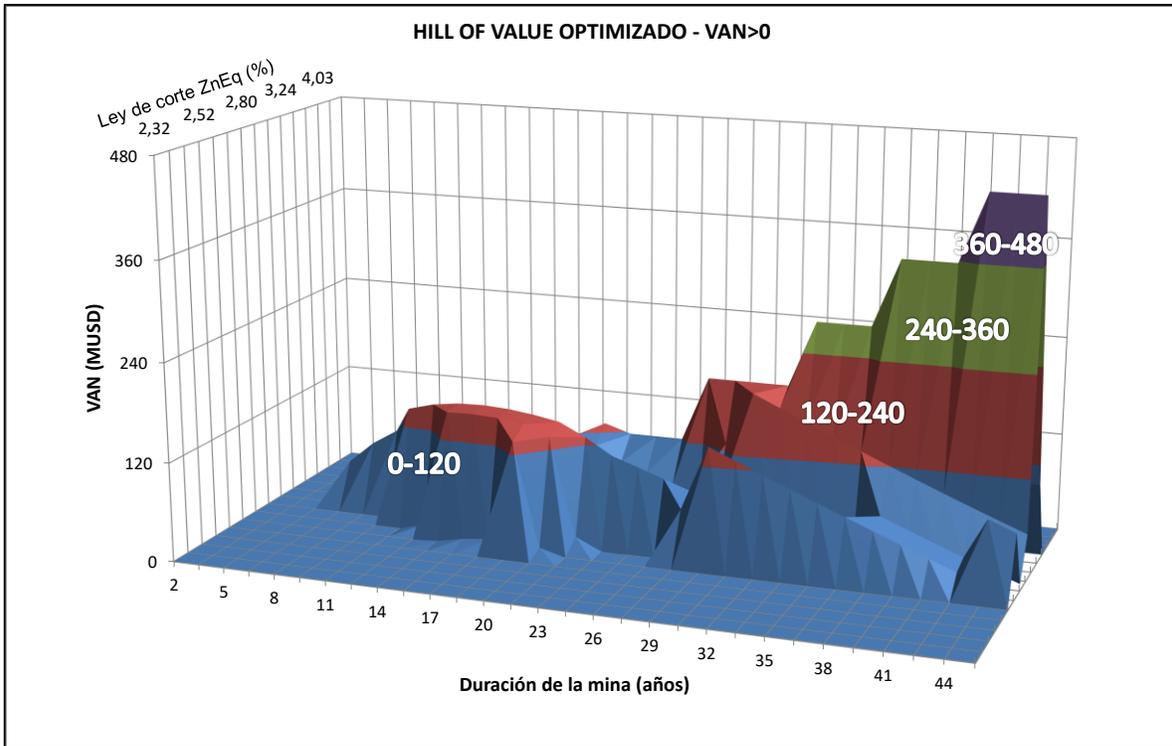


Gráfico 6-10: Hill of Value Optimizado VAN>0, Proyecto 2

El Gráfico 6-11 da cuenta del VAN óptimo para cada ley de corte.

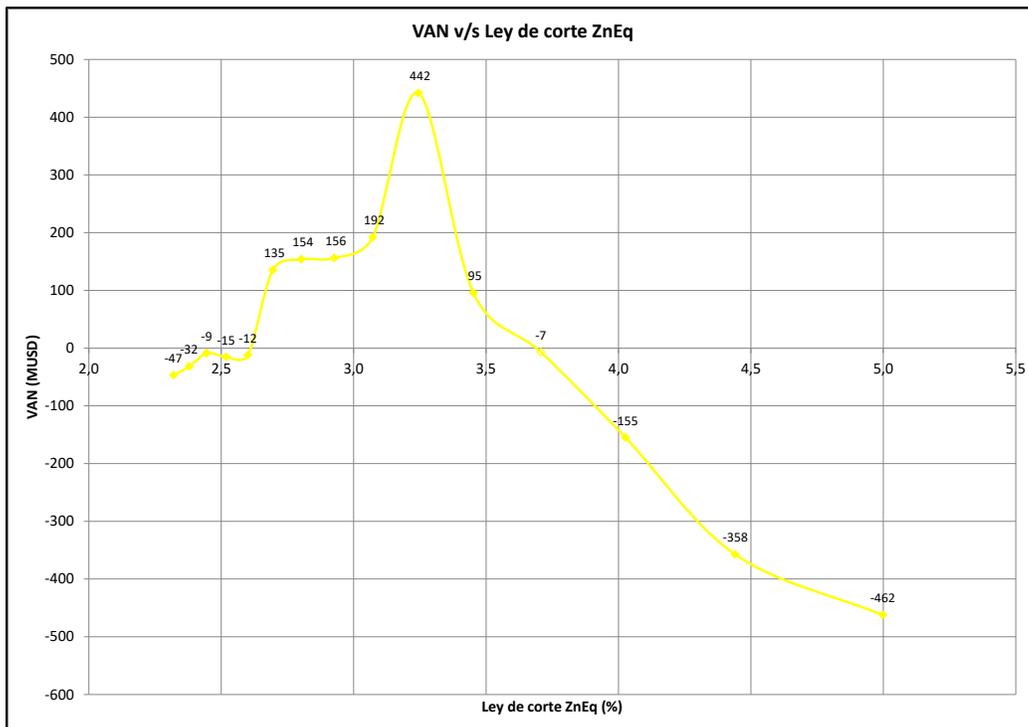


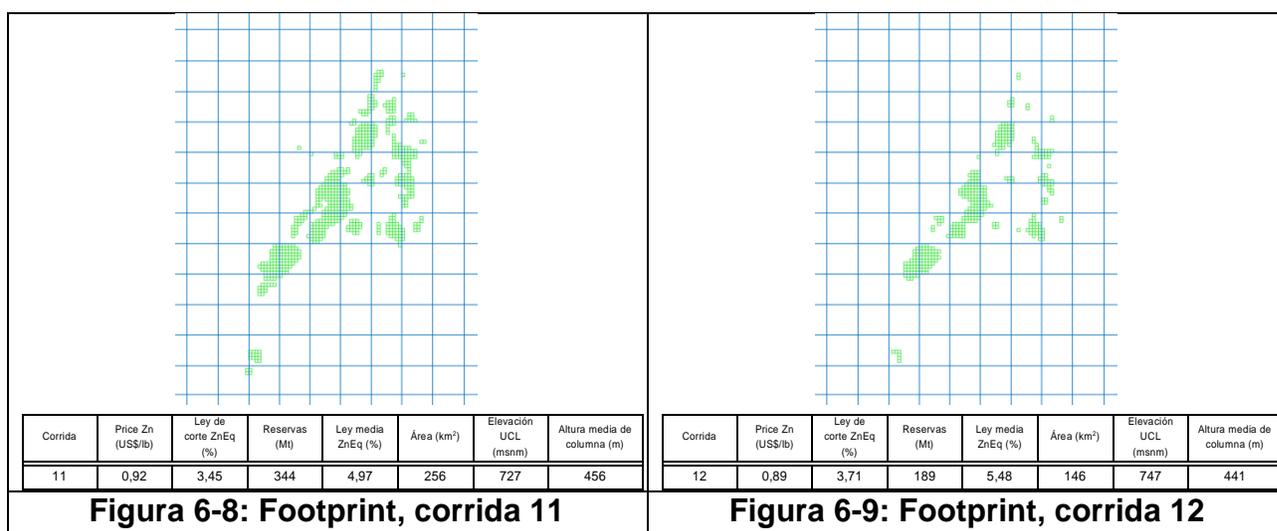
Gráfico 6-11: Mayor VAN optimizado para cada ley de corte ZnEq, Proyecto 2

La Tabla 6-7 detalla las características de la selección de reservas, donde se han destacado en color verde las corridas que presentan un mayor VAN.

Tabla 6-7: Valorización de reservas optimizada para leyes de ZnEq, Proyecto 2

Corrida	Precio Zn (USD/lb)	Ley de corte de ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Ritmo de producción (kt/d)	Duración de la mina (años)	VAN (MUSD)	IVAN
1	1,22	2,32	1.360	3,63	128	37	-47	0,09
2	1,19	2,38	1.323	3,67	134	35	-32	0,09
3	1,16	2,44	1.286	3,71	86	48	-9	0,10
4	1,13	2,52	1.244	3,75	83	48	-15	0,10
5	1,10	2,60	1.184	3,81	124	34	-12	0,10
6	1,07	2,69	1.092	3,91	114	33	135	0,12
7	1,04	2,80	977	4,02	115	30	154	0,17
8	1,01	2,93	861	4,16	106	29	156	0,16
9	0,98	3,07	668	4,41	54	39	192	0,21
10	0,95	3,24	526	4,63	48	32	442	0,33
11	0,92	3,45	344	4,97	38	29	95	0,24
12	0,89	3,71	189	5,48	22	25	-7	0,27
13	0,86	4,03	90	6,11	12	21	-155	0,25
14	0,83	4,44	31	7,00	5	16	-358	0,07
15	0,80	5,00	6	8,06	2	10	-462	-0,24

En este caso, no se utiliza el criterio mencionado en el capítulo 2.10 de considerar la ley de corte que presenta el VAN mayor y las 2 leyes de corte inmediatamente superiores, debido a la falta de continuidad de la mineralización, como se observa claramente en la Figura 6-8 y Figura 6-9 de las corridas 11 y 12, lo que no las hace competitivas con respecto a aquellas con leyes de corte menores.



6.2.4 Plan minero

La preparación de los planes mineros se realiza para las corridas 8, 9 y 10 (leyes de corte de ZnEq de 2,93 %; 3,07 % y 3,24 % respectivamente), las que son candidatas a óptimos de acuerdo al VAN estimado por Hill of Value Optimizado. La secuencia de las columnas se realiza privilegiando la extracción temprana de aquellas con un mayor beneficio por tonelada. En Anexo E, se detallan los footprint de estas corridas, agrupando las columnas según sus beneficios.

El Gráfico 6-12 representa el ritmo de producción de las corridas. De igual forma que lo realizado para el Proyecto 1, en este caso, fue necesario darle continuidad al cuerpo a extraer, haciendo análisis del tipo costo-beneficio para grupos de columnas, para en algunos casos incluir estéril o dejar de extraer mineral.

Para cada uno de estos 3 escenarios, las reservas a extraer resultaron ser significativamente diferentes (861 Mt, 668 Mt y 526 Mt para leyes de corte de ZnEq de 2,93 %; 3,07 % y 3,24 % respectivamente). Con el objetivo de hacer un análisis comparativo que no perjudique o beneficie alguno de los 3 escenarios, la preparación de los planes mineros considera lo siguiente:

- El ritmo de producción fue fijado en 70 kt/d, que fue obtenido de los estudios del proyecto original, al igual que el Proyecto 1.
- Ramp-up idéntico, lo que se observa en el Gráfico 6-12.

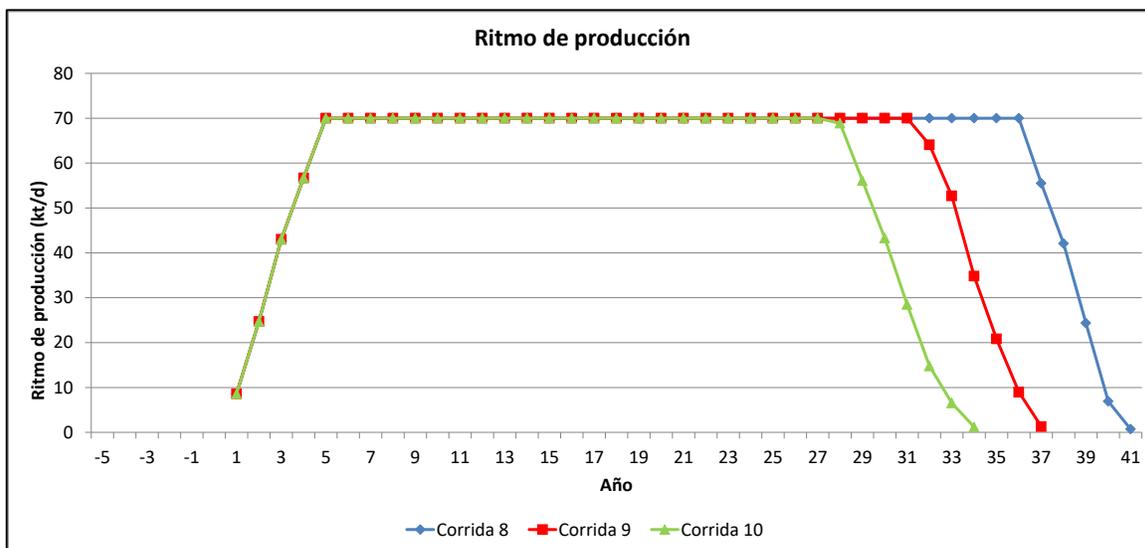


Gráfico 6-12: Ritmo de producción, Proyecto 2

El Gráfico 6-13 da cuenta del perfil de leyes de los 3 escenarios evaluados.

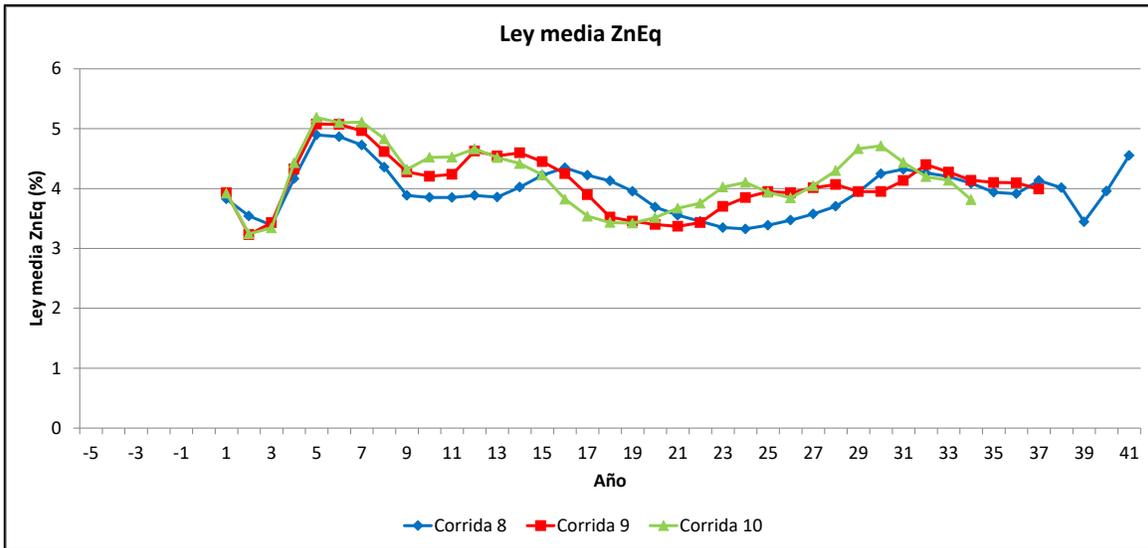


Gráfico 6-13: Ley media de ZnEq, Proyecto 2

El Gráfico 6-14 detalla la incorporación de área para los 3 planes mineros. Con el objetivo de acortar el periodo de ramp-up y así aumentar el VAN, la estrategia seguida fue la misma utilizada para el Proyecto 1, es decir, incorporar una gran cantidad de área los 2 primeros años y posteriormente mantener una incorporación mínima de área prácticamente constante en el tiempo satisfaciendo los requerimientos de producción.

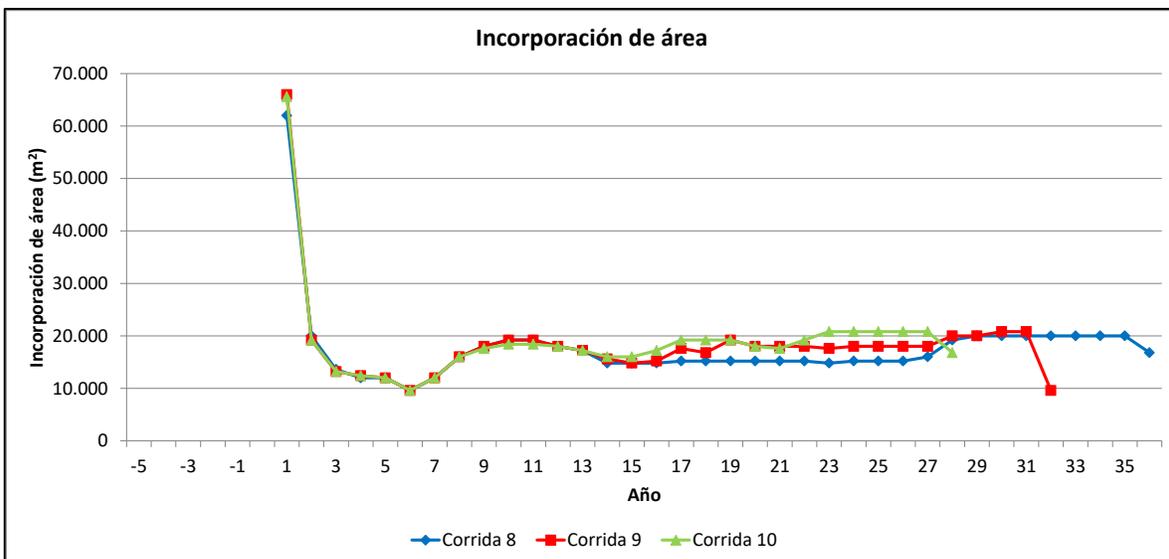


Gráfico 6-14: Incorporación de área, Proyecto 2

6.2.5 Evaluación económica

Se siguen los mismos supuestos de la evaluación económica del Proyecto 1, descritos en capítulo 6.1.5.

El Gráfico 6-15 muestra los ingresos de cada una de las corridas evaluadas. La relación es directa con el Gráfico 6-13 (ley media de ZnEq), en el sentido de que mayores leyes se reflejan en mayores ingresos y viceversa.

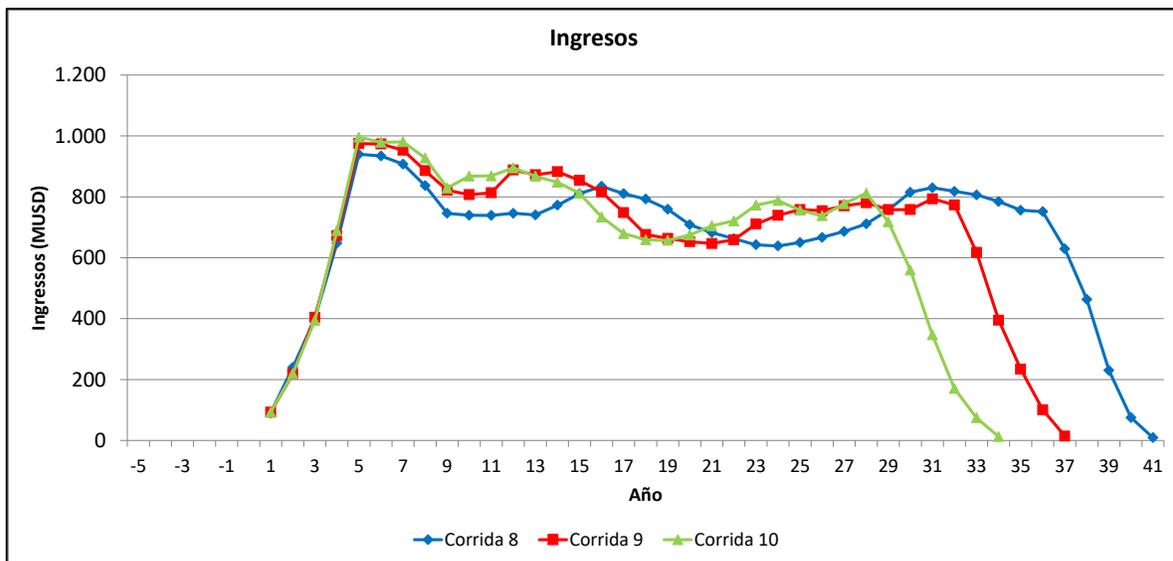


Gráfico 6-15: Ingresos, Proyecto 2

En Anexo C se detallan los gastos de operación, las inversiones y los flujos netos del Proyecto 2 (Figura C-4, Figura C-5 y Figura C-6 respectivamente).

De igual forma que para el Proyecto 1, se realizaron 2 planes mineros adicionales, con leyes de corte: 2,69 y 2,80 %ZnEq (corridas 6 y 7 respectivamente), las que estiman un VAN menor al de las otras corridas, de acuerdo al plan minero como se puede apreciar en la Tabla 6-8.

Adicionalmente, en la Tabla 6-8 se incluye la corrida 1 correspondiente a la estimada con la ley de corte marginal de 1,22 %ZnEq.

Tabla 6-8: VAN estimado por Hill of Value Optimizado y plan minero para corridas 1, 6, 7, 8, 9 y 10, Proyecto 2

Corrida	Ley de corte de ZnEq (%)	Ritmo de producción (kt/d)	Van Hill of Value (MUSD)	Van Hill of Value Optimizado (MUSD)	VAN plan minero (MUSD)
1	1,22	70	No aplica	-47	-59
6	2,69	70		135	99
7	2,80	70		154	122
8	2,93	70		156	141
9	3,07	70		192	156
10	3,24	70		442	294

De la Tabla 6-8 se concluye lo siguiente:

- La corrida 1 correspondiente a la marginal, es considerablemente menos atractiva que las obtenidas con leyes de corte mayores.
- El VAN Hill of Value Optimizado estima bastante bien el VAN del proyecto, entendiendo que el VAN del plan minero es el más confiable por definición.
- La corrida 10 es la alternativa más atractiva con un VAN de 294 MUSD, una ley media de 4,20 %ZnEq y una ley de corte 3,24 %ZnEq.

El plan minero de la corrida 10 se observa en el Gráfico 6-16. El valor máximo de la ley media se da entre los años 5 y 7, siendo el año 5 cuando se llega a régimen.

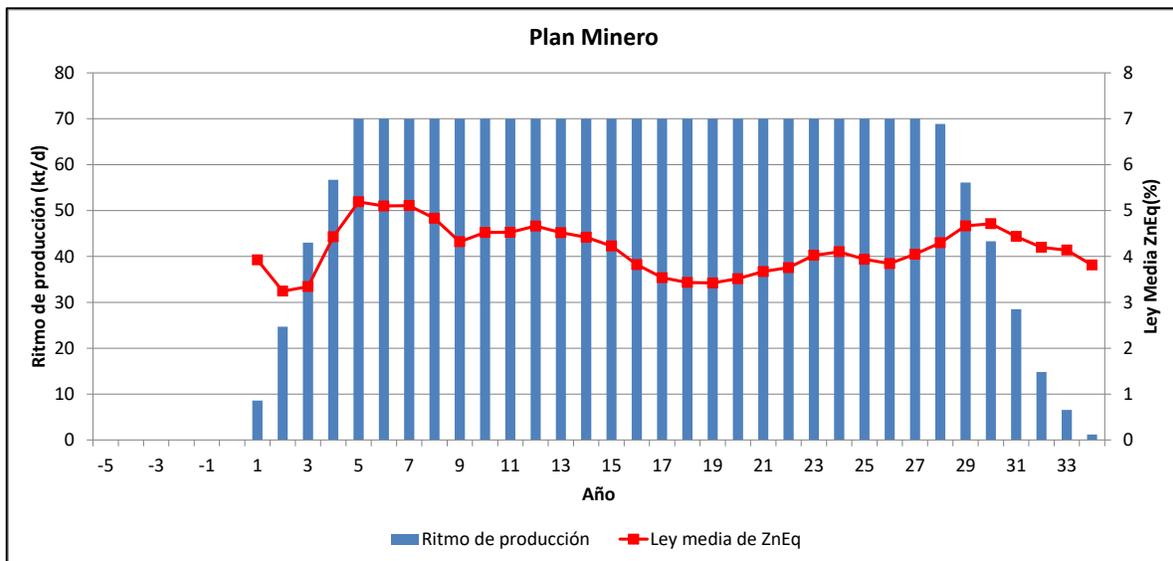


Gráfico 6-16: Plan minero corrida 10, Proyecto 2

6.3 Análisis de sensibilidad

En este capítulo se busca cuantificar la sensibilidad de los Proyectos 1 y 2 frente a variaciones de las siguientes variables:

- Costo mina.
- Tasa de descuento.
- Precio de los metales: cobre para el Proyecto 1 y zinc para el Proyecto 2.

Partiendo de la situación base de cada proyecto, se generan valores optimistas y pesimistas de las variables.

Para el análisis se utilizan las leyes de corte que resultan más atractivas para cada proyecto:

- Proyecto 1: corridas 11, 12 y 13 con leyes de corte equivalente de cobre de 0,46; 0,49 y 0,53 %CuEq respectivamente.
- Proyecto 2: corridas 8, 9 y 10 con leyes de corte 2,93; 3,07 y 3,24 %ZnEq respectivamente.

La Tabla 6-9 detalla los valores base, mínimos y máximos que se utilizan en el ejercicio de sensibilidad.

Para todos los análisis se utiliza el VAN estimado por el plan minero.

Tabla 6-9: Valores utilizados en análisis de sensibilidad

Ítem	Unidad	Base	Mínimo	Máximo
Costo mina	USD/t	5,67	2,67	8,67
Tasa de descuento	%	10	5	15
Precio del cobre	USD/lb	3,0	2,5	3,5
Precio del zinc	US\$/lb	1,22	1,07	1,37

6.3.1 Costo mina

El valor base del costo mina es de 5,67 USD/t y el VAN resultante ante su variación se observa en el Gráfico 6-17 (Proyecto 1) y en el Gráfico 6-18 (Proyecto 2). La dependencia lineal entre el costo mina y el VAN es bastante similar para las 3 corridas en ambos proyectos, observándose una disminución (o aumento) del VAN

de aproximadamente 75 MUSD con un aumento (o disminución) del costo mina de 0,60 USD/lb.

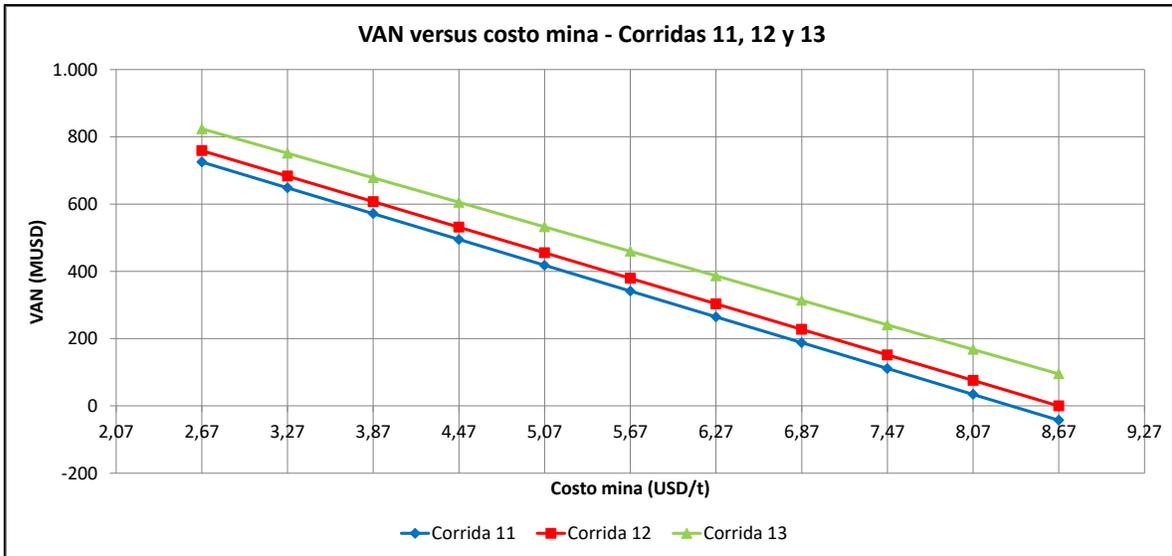


Gráfico 6-17: Análisis de sensibilidad costo mina, Proyecto 1

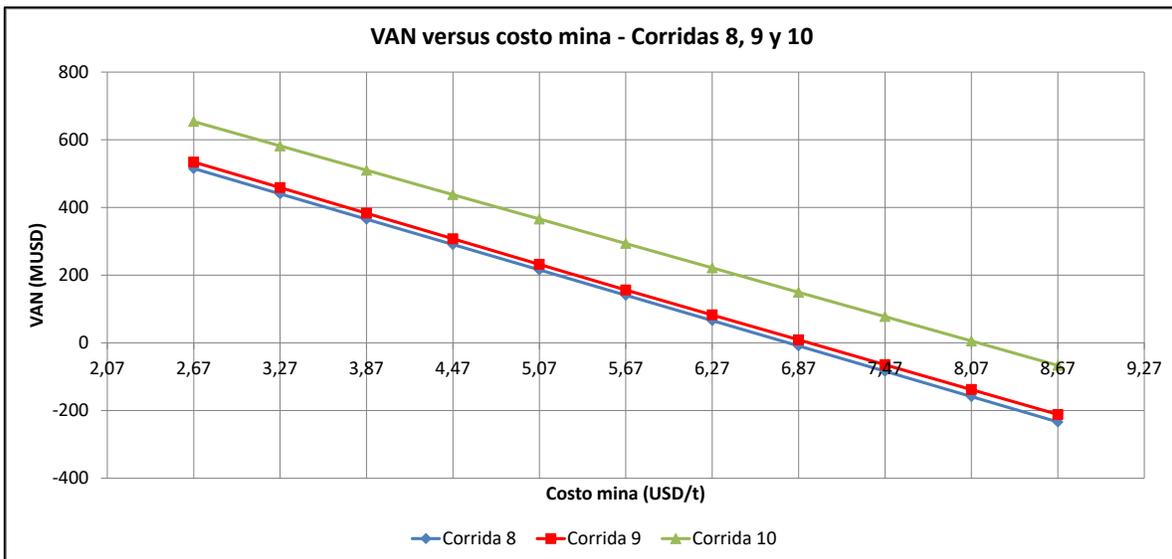


Gráfico 6-18: Análisis de sensibilidad costo mina, Proyecto 2

En Anexo F se detalla el análisis de sensibilidad del VAN en función del costo mina para otros ritmos de producción (Figura F-1 para Proyecto 1 y Figura F-2 para Proyecto 2).

Se concluye que la variación en el costo mina, impacta moderadamente el VAN.

6.3.2 Tasa de descuento

El valor de la tasa de descuento juega un rol fundamental en el valor presente de los flujos futuros. Si la tasa es alta, los flujos futuros pesan poco a la hora de evaluar un proyecto, mientras que si la tasa es baja, sucede lo contrario.

En ambos proyectos, se utiliza una tasa de descuento base del 10 %, la que puede parecer elevada en primera instancia, pero es la tasa promedio utilizada en la industria minera en escenarios de largo plazo, donde existe poca información y por lo general una cartera competitiva de otros proyectos alternativos.

El Gráfico 6-19 y Gráfico 6-20 muestran la variación del VAN en función de la tasa de descuento, donde se aprecia que la tendencia no es lineal.

Por ejemplo, para el Proyecto 1 (Gráfico 6-19) si la tasa de descuento baja del 10 % al 9 %, el VAN aumenta aproximadamente en 280 MUSD (de 400 MUSD a 680 MUSD). En cambio sí baja del 6 % al 5 % el VAN aumenta aproximadamente en 750 MUSD (de 2.000 MUSD a 2.750 MUSD).

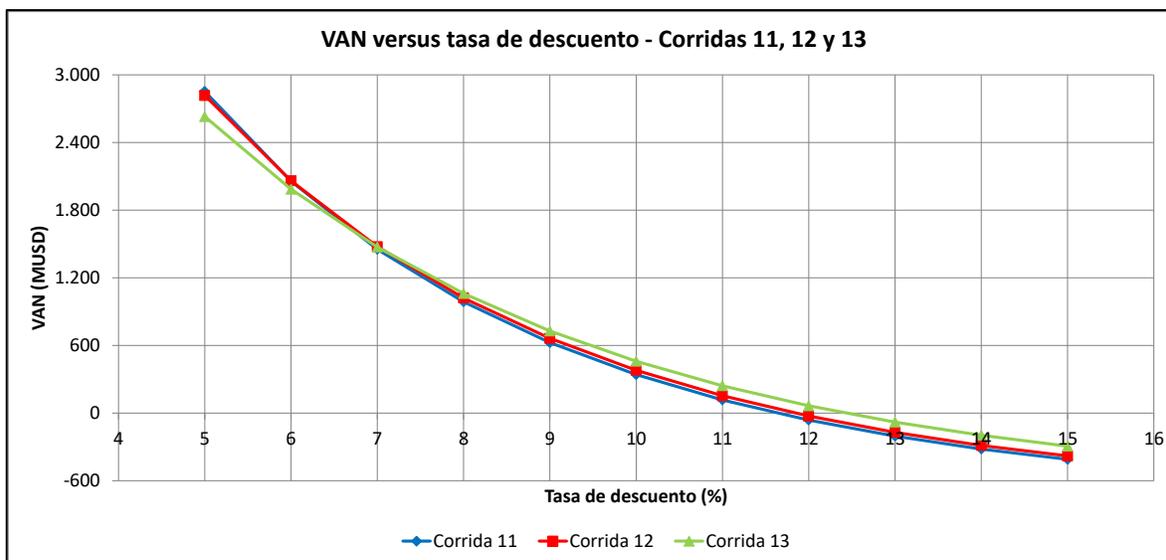


Gráfico 6-19: Análisis de sensibilidad tasa de descuento, Proyecto 1

Para el Proyecto 2 (Gráfico 6-20) si la tasa de descuento baja del 10 % al 9 %, el VAN aumenta aproximadamente en 250 MUSD (de 250 MUSD a 500 MUSD). En cambio sí baja del 6 % al 5 % el VAN aumenta aproximadamente en 650 MUSD (de 1.700 MUSD a 2.350 MUSD).

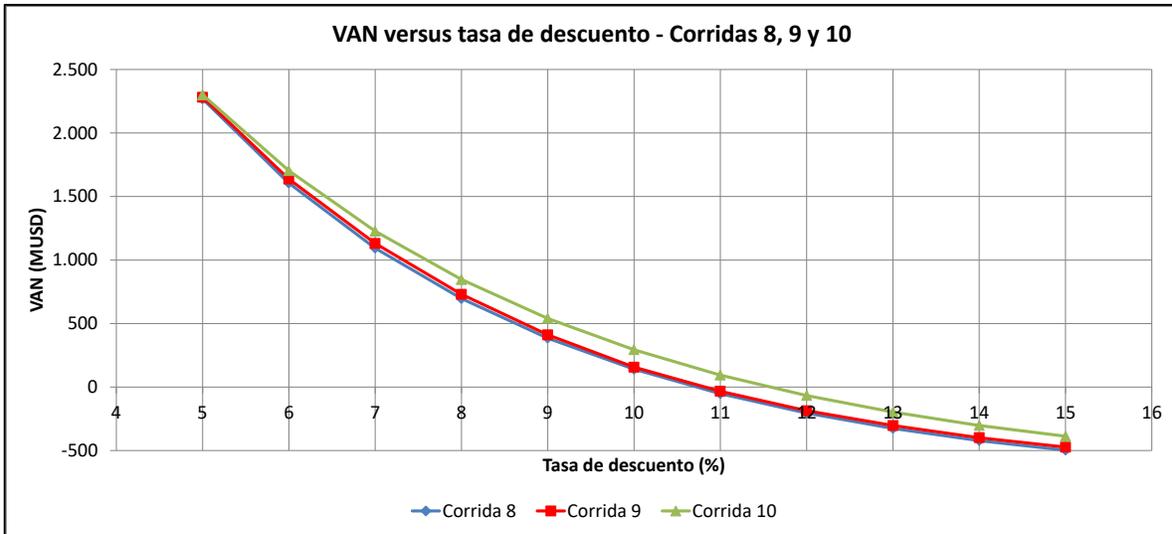


Gráfico 6-20: Análisis de sensibilidad tasa de descuento, Proyecto 2

En Anexo F se detalla el análisis de sensibilidad del VAN en función de la tasa de descuento para otros ritmos de producción (Figura F-3 para Proyecto 1 y Figura F-4 para Proyecto 2).

Se concluye que la variación en la tasa de descuento, impacta significativamente el VAN.

6.3.3 Precio de los metales

Es sabido que el precio de los metales es de vital relevancia a la hora de evaluar un proyecto y a diferencia del costo mina y la tasa de descuento, es una variable que depende del mercado y no podemos predecirla con certeza.

El Gráfico 6-21 nos muestra la relación entre el VAN y el precio del cobre para el Proyecto 1, partiendo de un precio base de 3,0 USD/lb. La relación lineal nos permite calcular una tasa constante de variación. A modo de ejemplo, por cada 0,10 USD/lb de aumento (o disminución) del precio del cobre, el VAN aumenta (o disminuye) en 155 MUSD aproximadamente.

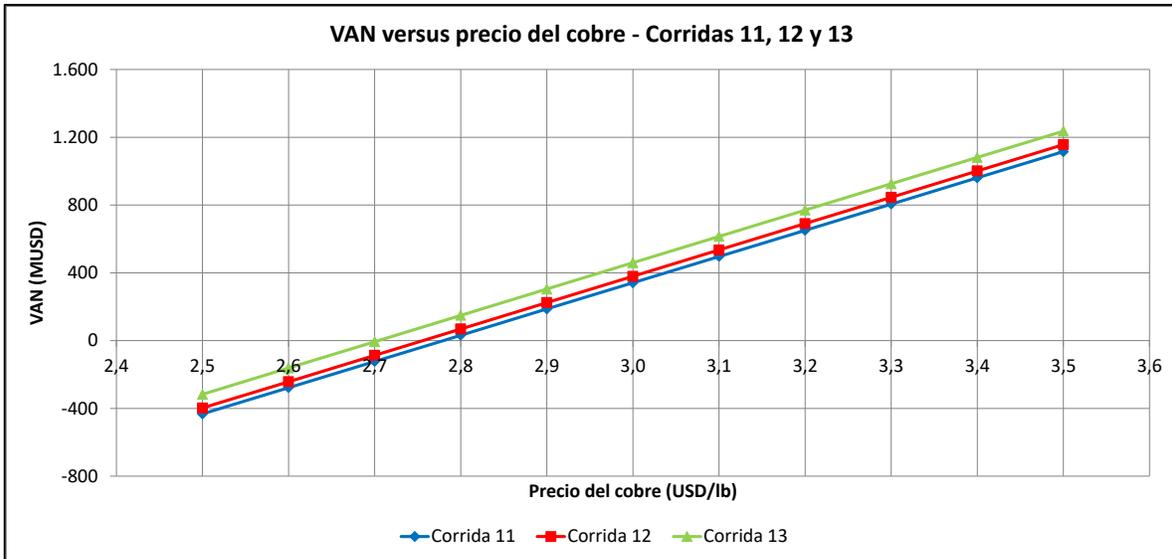


Gráfico 6-21: Análisis de sensibilidad precio del cobre, Proyecto 1

El Gráfico 6-22 nos muestra la relación entre el VAN y el precio del zinc para el Proyecto 2, partiendo de un precio base de 1,22 USD/lb. La relación lineal nos permite calcular una tasa constante de variación. A modo de ejemplo, por cada 0,03 USD/lb de aumento (o disminución) del precio del zinc, el VAN aumenta (o disminuye) en 310 MUSD aproximadamente.

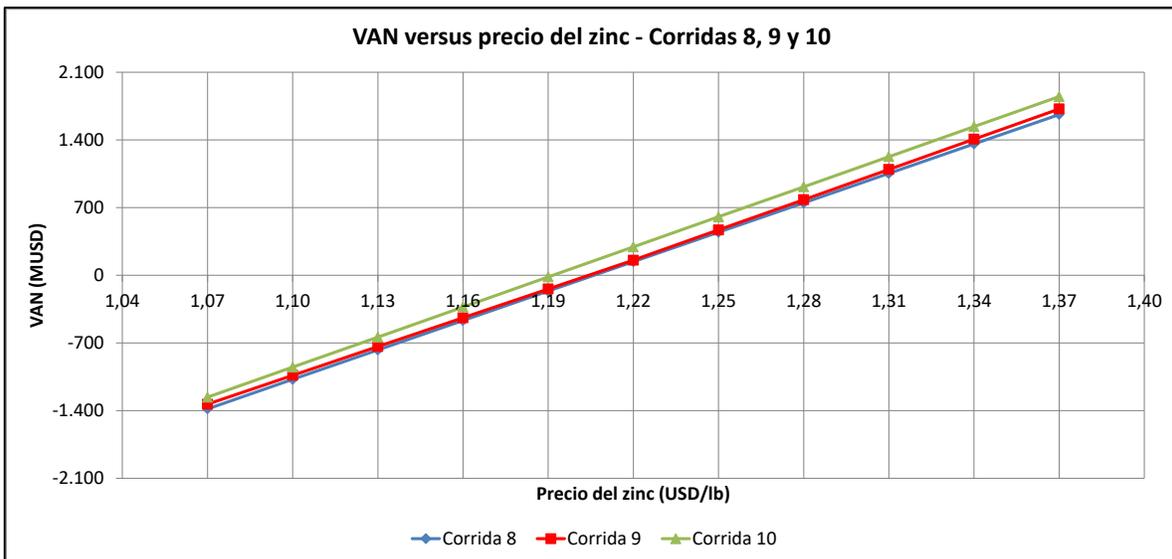


Gráfico 6-22: Análisis de sensibilidad precio del zinc, Proyecto 2

En Anexo F se detalla el análisis de sensibilidad del VAN en función del precio del cobre (Figura F-5 para Proyecto 1) y en función del precio del zinc (Figura F-6 para Proyecto 2) para otros ritmos de producción.

Se concluye que la variación en el precio del metal, impacta significativamente el VAN, especialmente el del zinc para el Proyecto 2.

6.4 Análisis de los escenarios evaluados

6.4.1 Ritmo de producción a través de Hill of Value Optimizado

En la introducción del concepto de Hill of Value, se explica que el VAN puede ser estimado como una función de 2 variables: ley de corte y ritmo de producción. Sin embargo, a lo largo de este estudio, el foco siempre estuvo más puesto en la ley de corte que en el ritmo de producción.

Lo que sucede es que el ritmo de producción recomendado por Hill of Value Optimizado, si bien se utiliza para la estimación del VAN, no tiene un sustento que nos pueda dar luces de que estamos en el óptimo ritmo de producción y muchas veces, variaciones muy pequeñas en la ley de corte, entregan ritmos de producción muy diferentes. Solo a modo de ejemplo, para el Proyecto 2, se da lo siguiente:

- Corrida 8, ley de corte = 2,93 % ZnEq, reservas = 861 Mt, duración de la mina = 29 años, ritmo de producción = 106 kt/d.
- Corrida 9, ley de corte = 3,07 % ZnEq, reservas = 668 Mt, duración de la mina = 39 años, ritmo de producción = 54 kt/d.

Es decir, un pequeño cambio en la ley de corte, reduce el ritmo de producción prácticamente a la mitad, lo que no resulta muy lógico. El ritmo depende entre otros factores, del diseño de la planta de procesos, la que generalmente ofrece capacidades de proceso discretas. Por lo tanto, al preparar el plan minero, no se recomienda utilizar el ritmo de producción sugerido por el Hill of Value Optimizado.

6.4.2 Ritmo de producción a través del plan minero

El ritmo de producción de 70 kt/d es utilizado en la preparación de los planes mineros para los Proyectos 1 y 2. Este ritmo proviene de los estudios de los

proyectos originales que por tema de confidencialidad, no pueden ser referenciados.

Para el caso del Proyecto 1, los estudios originales solo analizan esta alternativa de capacidad productiva y para el Proyecto 2, existen 3 ritmos de producción: 50 kt/d, 70 kt/d y 100 kt/d, que para efectos de simplificar el análisis de este trabajo, se considera únicamente el de 70 kt/d.

Más allá de la definición anterior, el Gráfico 6-23 da cuenta del VAN para distintos ritmos de producción entre 40 kt/d y 180 kt/d, considerando la corrida que resultó óptima en el Proyecto 1, es decir, la corrida 13.

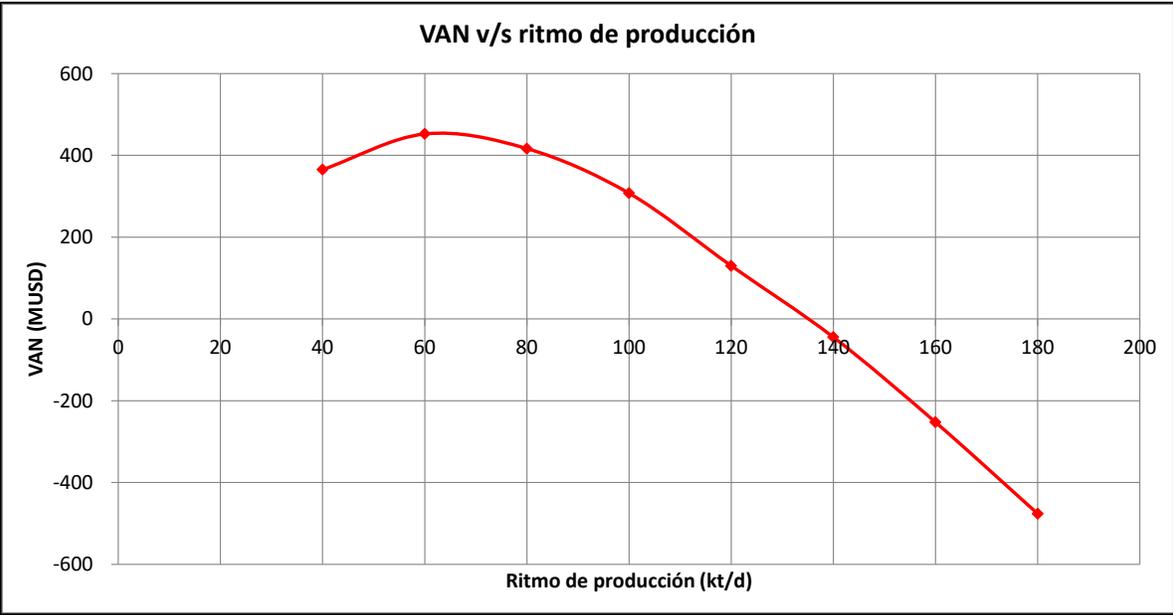


Gráfico 6-23: VAN v/s ritmo de producción, corrida 13, Proyecto 1

El Gráfico 6-24 da cuenta del VAN para distintos ritmos de producción entre 40 kt/d y 180 kt/d, considerando la corrida que resultó óptima en el Proyecto 2, es decir, la corrida 10.

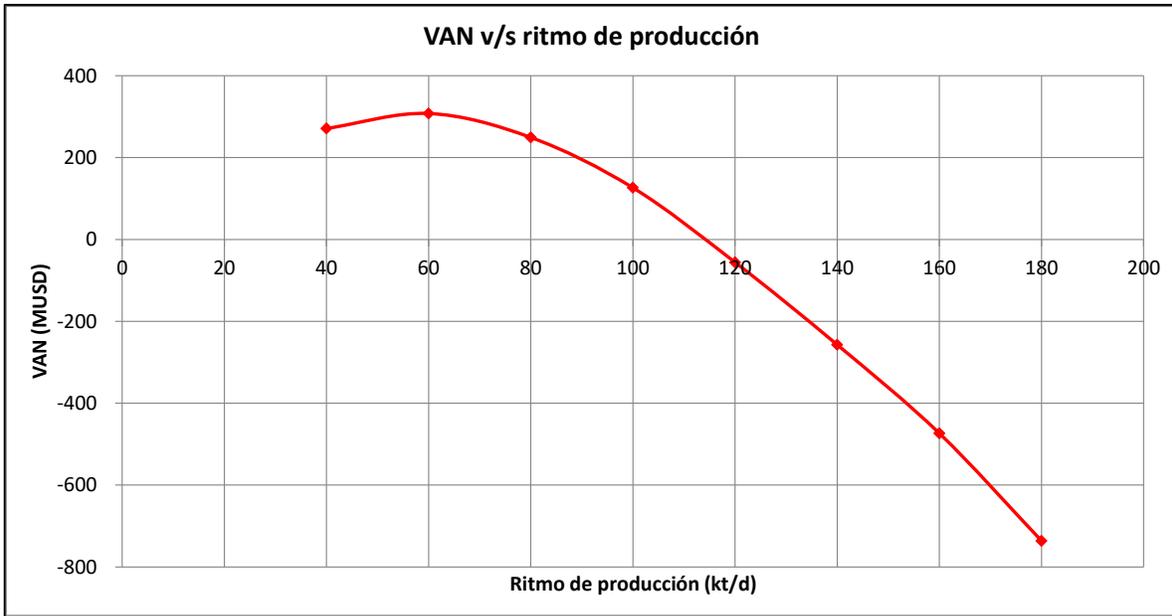


Gráfico 6-24: VAN v/s ritmo de producción, corrida 10, Proyecto 2

Para ambos proyectos, se concluye que el ritmo de producción que maximiza el VAN está en el rango de 60 kt/d a 70 kt/d.

6.4.3 Proyecto 1

El Gráfico 6-25 muestra los resultados de VAN utilizando Hill of Value, Hill of Value Optimizado y plan minero para las corridas 1, 9, 10, 11, 12 y 13 del Proyecto 1.

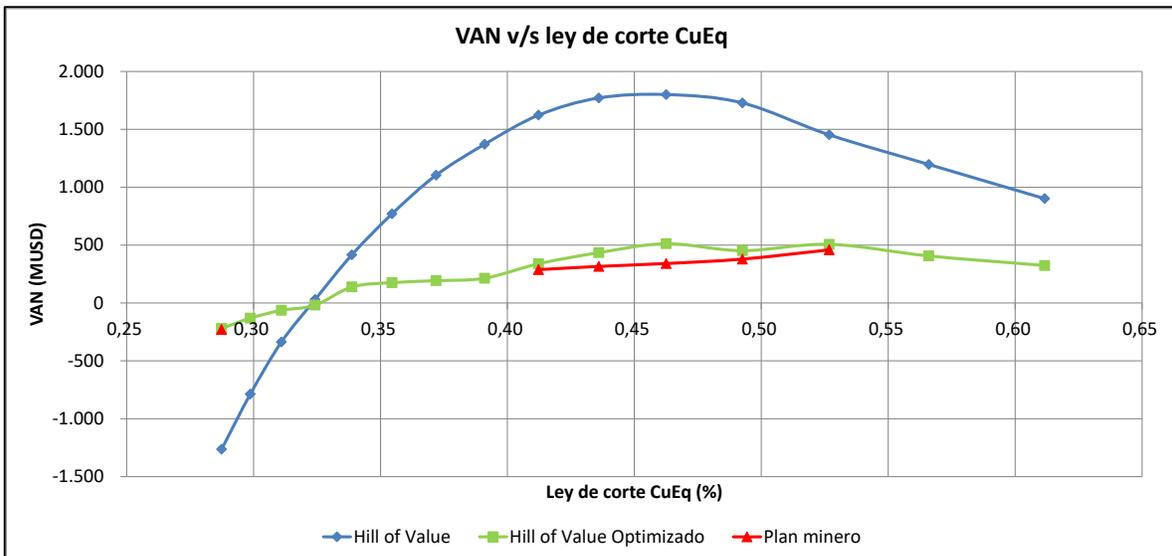


Gráfico 6-25: VAN v/s ley de corte CuEq, Proyecto 1

Se observa claramente que para la ley de corte marginal de 0,29 %CuEq, el VAN es menor que cualquier otro obtenido con una ley de corte superior. En particular, en el rango 0,42 – 0,53 %CuEq aproximadamente, las tres series coinciden en presentar el mayor VAN.

Para el Hill of Value se ratifica que sobreestima el VAN de forma considerable. Para Hill of Value Optimizado y plan minero, la estimación del VAN es bastante similar, siendo levemente menor el VAN del plan minero para cada ley de corte evaluada.

En términos de horas hombre dedicadas a la evaluación de Hill of Value Optimizado y plan minero, este último requiere aproximadamente 150 horas hombre para preparar un solo plan minero, lo que se traduce en 900 horas hombre para construir la curva con 6 puntos en el Gráfico 6-25. La preparación de la curva Hill of Value Optimizado toma aproximadamente 80 horas hombre. Esta considerable diferencia, es muy importante sobre todo si estamos en una ingeniería de perfil, donde muchas veces no hay disponibles muchas horas para la planificación minera y necesitamos contar con un estimación inicial del VAN y de la selección de reservas.

La Tabla 6-10 presenta los resultados de las tres corridas con mayor VAN y compara los footprint matemáticos y suavizados.

Tabla 6-10: Resumen de corridas 11, 12 y 13, Proyecto 1

Corrida	Ley de corte de CuEq (%)	Footprint matemático			Footprint suavizado			Elevación UCL (msnm)
		Ley media CuEq (%)	Reservas (Mt)	Área (m ²)	Ley media CuEq (%)	Reservas (Mt)	Área (m ²)	
11	0,46	0,540	1.227	591.875	0,536	1.256	612.500	3.465
12	0,49	0,560	1.024	501.875	0,556	1.049	514.375	3.480
13	0,53	0,597	715	354.375	0,590	755	375.625	3.540

La diferencia entre los footprint matemáticos y suavizados no es muy significativa, lo que hace que la ley media baje ligeramente y las reservas y el área del footprint aumenten moderadamente al suavizar el footprint. Las características de continuidad espacial del yacimiento entregan estos resultados en que no hay mayor pérdida de valor por la inclusión de estéril y la no extracción de mineral al suavizar.

6.4.4 Proyecto 2

Para el caso del Proyecto 2, solamente se focaliza el esfuerzo en la metodología de Hill of Value Optimizado y en el plan minero como ya fue mencionado, tal como se observa en el Gráfico 6-26.

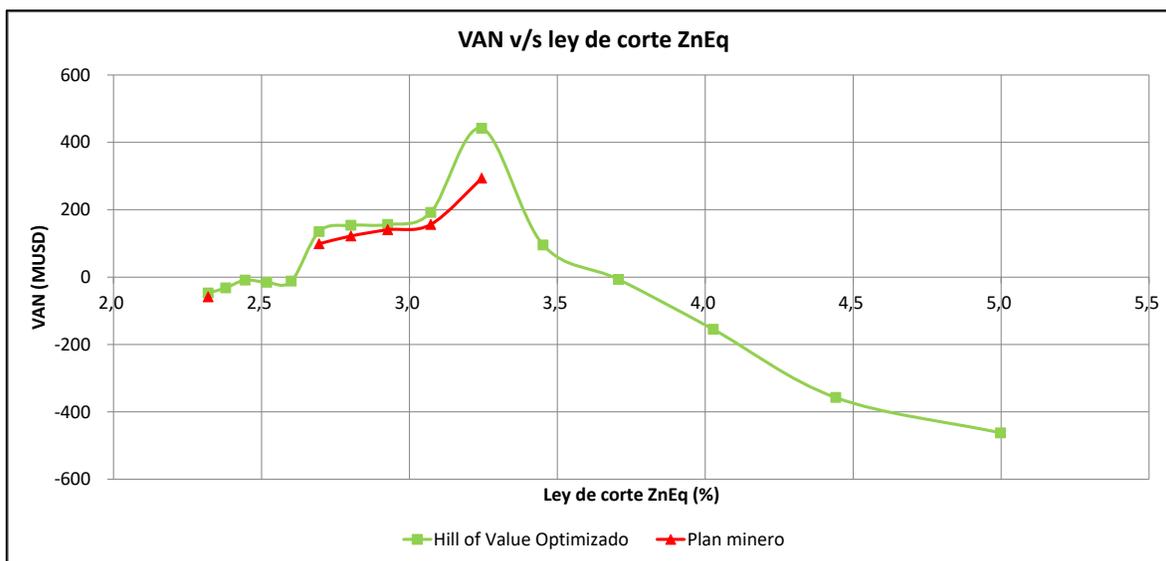
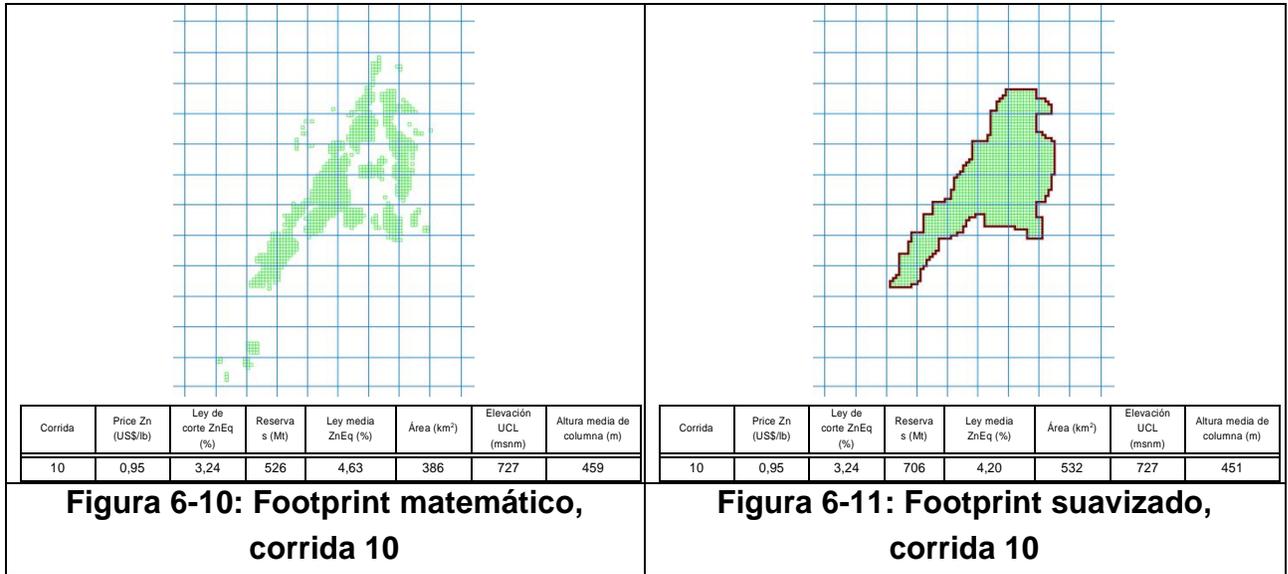


Gráfico 6-26: VAN v/s ley de corte ZnEq, Proyecto 2

El Gráfico 6-26 da cuenta de los resultados de Hill of Value Optimizado y plan minero para las corridas 1, 6, 7, 8, 9 y 10 donde se aprecia claramente que ambas series entregan valores de VAN muy similares para cada ley de corte de ZnEq, excepto para la corrida 10 (ley de corte de 3,24 %ZnEq). En este caso, el VAN Hill of Value Optimizado es de 294 MUSD y el del plan minero de 442 MUSD.

Esta última diferencia de VAN en el Proyecto 2 se debe a que existe una disparidad importante entre el footprint matemático y suavizado en algunas corridas, ya que la distribución espacial de las leyes es menos continua comparada con la del Proyecto 1.

En particular, para el caso de la corrida 10, la Figura 6-10 y Figura 6-11 comparan el footprint matemático y suavizado, donde se aprecia claramente que se debe incorporar una gran cantidad de estéril y dejar de extraer mineral para darle continuidad a la explotación.



El Gráfico 6-27 corresponde a una cubicación del estéril extraído y del mineral sin extraer, al hacer el ejercicio de pasar del footprint matemático al suavizado desde la corrida 1 a la corrida 10.

El porcentaje de mineral sin extraer y estéril extraído se considera con respecto a las reservas obtenidas en forma matemática.

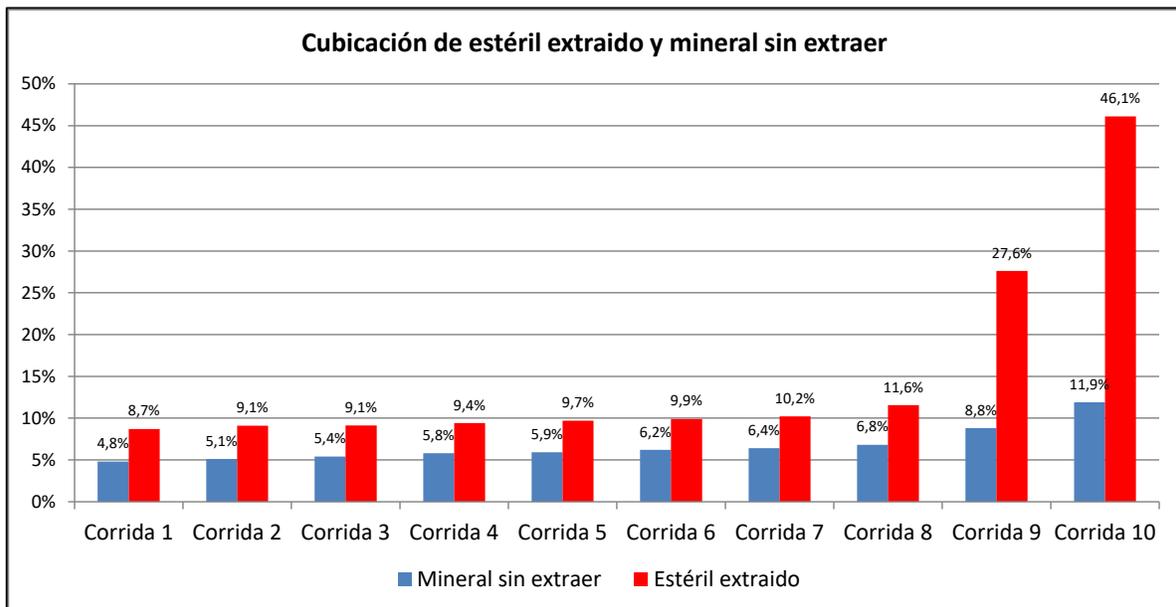


Gráfico 6-27: Cubicación de estéril extraído y mineral sin extraer al pasar desde el footprint matemático al suavizado, Proyecto 2

No se incluyen en este análisis desde la corrida 11 a la corrida 15, ya que no son casos factibles de explotar por Block Caving, por falta de continuidad espacial de la mineralización, de acuerdo a lo analizado en el capítulo 6.2.

Como fue mencionado en el capítulo 3.2, la metodología de Hill of Value Optimizada, considera un valor promedio de 10 % de estéril extraído y un 6 % de mineral sin extraer, que como se puede ver en el Gráfico 6-27, se ajusta bastante bien desde la corrida 1 hasta la corrida 8. Sin embargo, a partir de la corrida 9 y especialmente en la corrida 10, la presencia excesiva de estéril (46,1 %) y no extracción de mineral (11,9 %), termina sobrestimando de forma artificial el VAN estimado por Hill of Value Optimizado.

La Tabla 6-11 presenta los resultados de las tres corridas con mayor VAN y compara los footprint matemáticos y suavizados, donde destaca el hecho de que para la corrida 10, existe una diferencia importante de reservas (526 Mt v/s 706 Mt respectivamente), lo que se explica fundamentalmente por la incorporación de estéril como ya ha sido mencionado.

Tabla 6-11: Resumen de corridas 8, 9 y 10, Proyecto 2

Corrida	Ley de corte de ZnEq (%)	Footprint matemático			Footprint suavizado			Elevación UCL (msnm)
		Ley media ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Área (m ²)	Ley media ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Área (m ²)	
8	2,93	4,157	861	618.000	3,972	901	636.800	707
9	3,07	4,406	668	492.000	4,122	794	586.000	727
10	3,24	4,633	526	385.600	4,203	706	532.000	727

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se recomienda continuar con los estudios del Proyecto 1, ya que presenta una VAN de 459 MUSD, una ley media de 0,59 %CuEq y una ley de corte 0,53 %CuEq.
- Se recomienda continuar con los estudios del Proyecto 2, ya que presenta una VAN de 294 MUSD, una ley media de 4,20 %ZnEq y una ley de corte 3,24 %ZnEq.
- La metodología de Hill of Value presentada por Vera & Ovalle (2014) sobreestima el VAN del proyecto, ya que considera supuestos irreales, tales como capacidad de producción constante, ley media constante, incorporación de área constante, inversiones en el año previo a la entrada en producción, footprint matemático y recuperación minera del 100 %.
- La metodología de Hill of Value Optimizada presentada en este trabajo, estima un VAN cercano al determinado a través de un plan minero, diferenciándose ambos en el entorno del 15 %. Esto se debe a que considera supuestos más reales a los considerados por Vera & Ovalle (2014): capacidad de producción variable en el tiempo, ley media variable, incorporación de área variable, perfil de inversiones en el tiempo, footprint suavizado y recuperación minera menor al 100 %.
- El óptimo VAN para un proyecto de Block Caving se obtiene para leyes de corte mayores a la marginal en la mayoría de los casos.
- Si el footprint matemático es bastante continuo, el VAN y ley de corte óptima son muy bien estimados, como es el caso del Proyecto 1. En caso contrario, es necesario incorporar una gran cantidad de estéril o dejar de extraer mineral para darle continuidad al yacimiento, por lo que el VAN obtenido por Hill of Value Optimizado podría ser sobreestimado, como es el caso del Proyecto 2, especialmente para la corrida 10.
- El rango de ritmo de producción en que la metodología entrega resultados satisfactorios, varía entre 50 kt/d y 180 kt/d. Ritmos fuera de este rango,

entregan resultados distorsionados, debido fundamentalmente a la forma de estimar los costos e inversiones de la mina, planta de procesos e infraestructura.

- La secuencia y el suavizamiento de columnas son muy difíciles de reproducir en Hill of Value Optimizado, especialmente en minas como el Proyecto 2.
- La variación del costo mina impacta moderadamente el VAN y la tasa de descuento y precio del metal impactan significativamente el VAN.
- La metodología de Hill of Value Optimizada puede ser implementada en menos del 10% del tiempo que requiere la preparación de los planes mineros.
- El ritmo de producción estimado por Hill of Value Optimizado, no debe ser utilizado como referencia para la preparación de los planes mineros.

7.2 Recomendaciones

- Generalmente las inversiones en la planta de proceso son escalonadas a partir de ciertos ritmos de producción, dependiendo de cuantas líneas de proceso tenga cada planta en particular. Por este motivo la forma de estimar la inversión en la planta, puede ser mejorada, realizando un estudio que considere configuraciones típicas para distintos ritmos de producción.
- Si bien se consideran distintos precios para la selección de reservas (o equivalentemente distintos beneficios de corte), para la evaluación económica sólo se considera un precio. Un análisis de incorporación de precios a través de futuros, puede resultar muy interesante para reducir la incertidumbre del proyecto.
- Los costos mina y planta considerados son constantes en el tiempo, lo que es una simplificación que puede cambiar parcialmente los resultados, ya que su perfil más típico sigue la forma de “curva de la bañera”, es decir, mayores en la etapa inicial y final de la mina y se mantienen relativamente constantes durante la etapa media. Un perfil de costos como el descrito, puede ser considerado en un estudio futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso Ovalle, “Maximum Mass Caving Production Capacity”, Sudbury, MASSMIN 2012.
- B. E. Hall, “How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value”, CIM Mining Conference and Exhibition, Montreal, 2003.
- Emilio Vargas, “Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica”, Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Universidad de Chile, 2014.
- Francisco de la Huerta, “Aplicación del criterio de costo de oportunidad en la planificación de producción de minas subterráneas”, Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, 1994.
- Javier Vasquez, “Optimization of Mining Planning in Block / Panel Caving Mines Including Development Activities”, APCOM 2017, Colorado, USA, 2017.
- Jean Michel Rendu, “An introduction to cut-off grade estimation”, SME, 2008.
- Lane, K. F., “Choosing the optimum cut-off grade”, Colorado School of Mines Quarterly, Vol. 59, N°4, 1964.
- Lane, K. F. “The economic definition of ore, cutoff grades in theory and practice”, Mining Journal books: London, 1988.
- Marco Vera, Alfonso Ovalle, “Optimizing Hill of Value for Block Caving”, Tercer simposio internacional en Block y Sublevel Caving, 2014.
- Manuel Rodríguez, “Optimización del plan de producción conjunto cielo abierto - subterránea”, Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Universidad de Chile, 2018.
- R. Castro, E. Gonzalez, E. Arancibia, “Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving”, Vol. 109, Journal 2009.
- Taylor H.K., “Rates of Working Mines – A Simple Rule of Thumb”, nota técnica Vol. 95, 1986.

ANEXO A – CÁLCULO DEL VAN EN EL HILL OF VALUE

$$VAN = \sum_{i=0}^n \frac{F_i}{(1+r)^i}$$

$$q = \frac{1}{1+r}$$

$$B = F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n$$

$$VAN_{SI} = B \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} = B(q + q^2 + q^3 + \dots + q^n) \quad (1)$$

$$q * VAN_{SI} = B(q^2 + q^3 + q^4 + \dots + q^{n+1}) \quad (2)$$

$$(1) - (2): VAN_{SI} - q * VAN_{SI} = VAN_{SI}(1 - q) = Bq - Bq^{n+1}$$

$$VAN_{SI} = \frac{Bq(1 - q^n)}{1 - q}$$

Dónde:

VAN = Valor Actual Neto.

VAN_{SI} = Valor Actual Neto sin considerar la inversión.

F_i = flujo de caja en el periodo i .

r = tasa de descuento.

n = número de periodos.

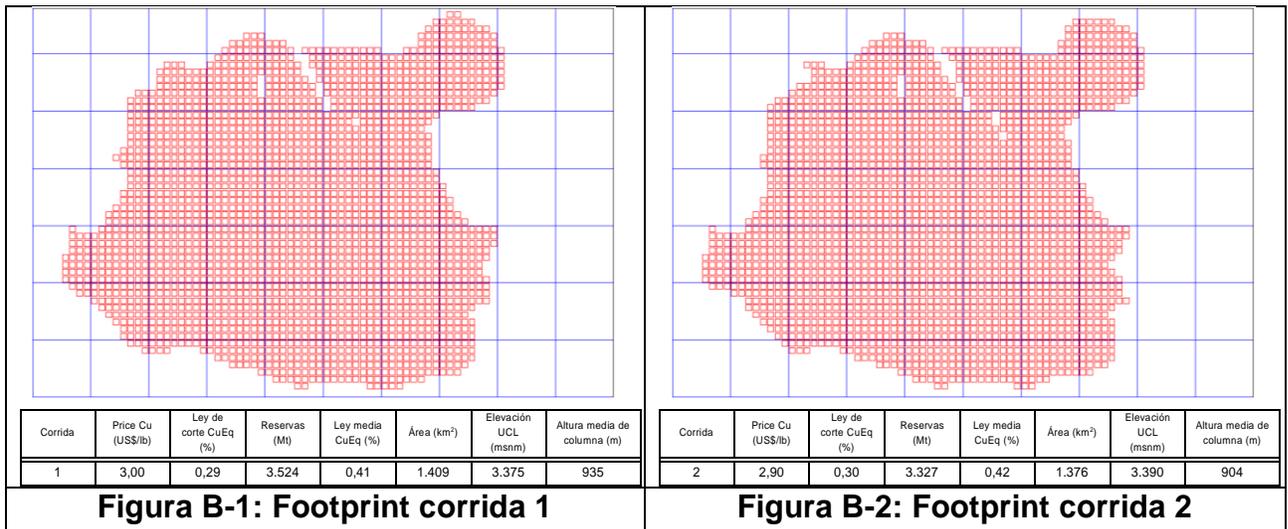
B = beneficio

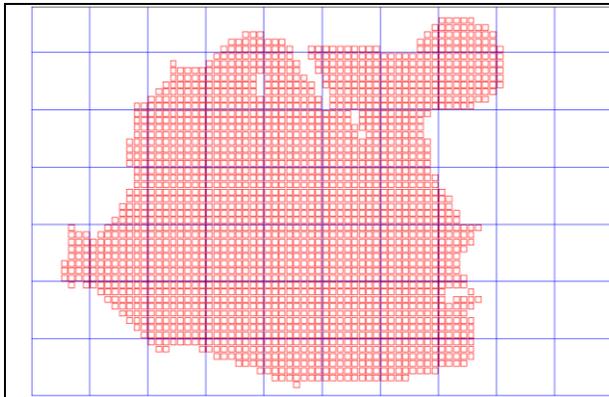
ANEXO B – FOOTPRINT MATEMÁTICO DE LAS 15 LEYES DE CORTE UTILIZADAS EN EL PROYECTO 1

En este Anexo se presentan 15 footprint matemáticos de corridas considerando las 15 leyes de corte de cobre equivalente utilizadas en el análisis del Proyecto 1. Adicionalmente, una tabla resumen de cada corrida es incluida con los siguientes parámetros:

- Número de la corrida.
- Precio Cu (USD/lb).
- Ley de corte de CuEq (%).
- Reservas (Mt).
- Ley media CuEq (%).
- Área (km²).
- Elevación UCL (msnm).
- Altura media de columna (m).

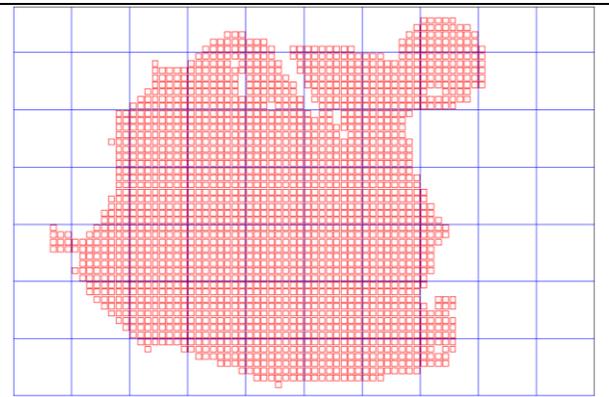
La grilla de color azul es de 200 m x 200 m y los bloques de color rojo son de 25 m x 25 m.





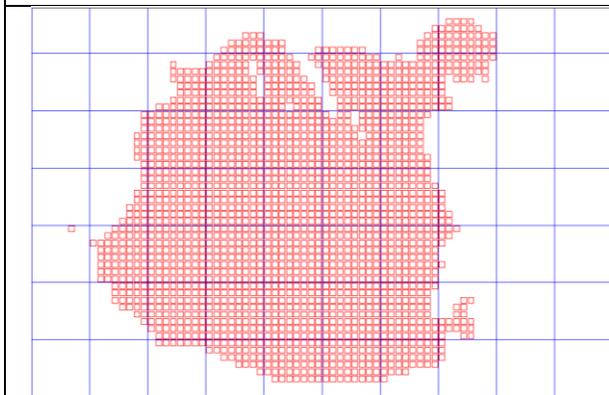
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
3	2,80	0,31	3.259	0,43	1.334	3.390	890

Figura B-3: Footprint corrida 3



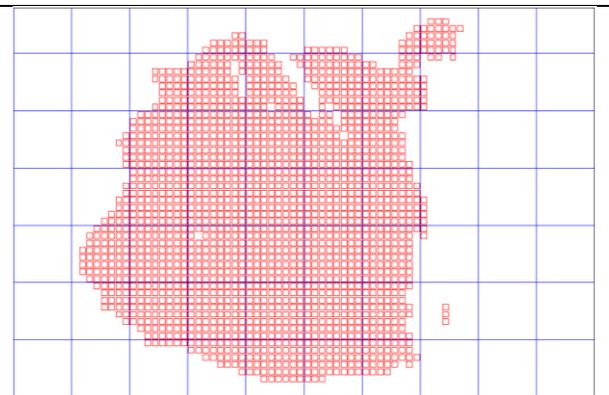
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
4	2,70	0,32	2.962	0,44	1.284	3.405	863

Figura B-4: Footprint corrida 4



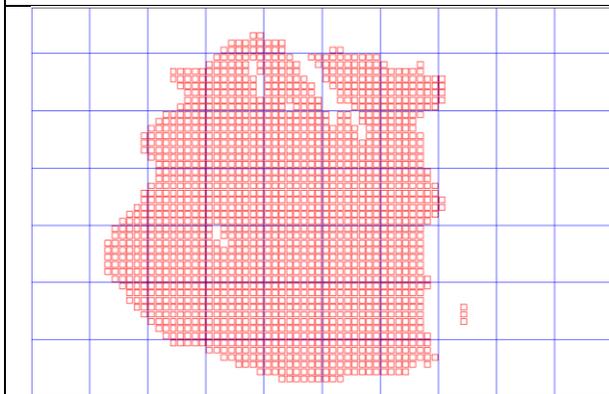
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
5	2,60	0,34	2.768	0,45	1.204	3.405	861

Figura B-5: Footprint corrida 5



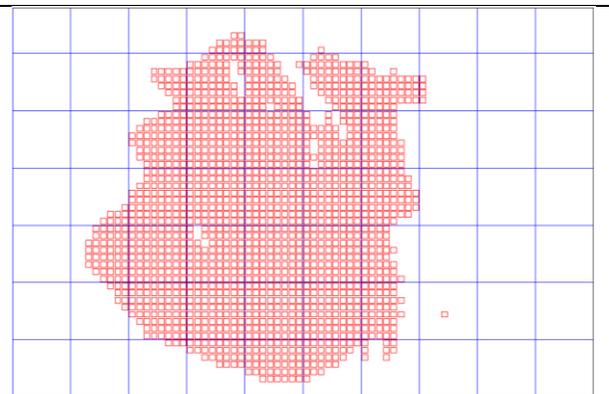
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
6	2,50	0,36	2.570	0,46	1.125	3.405	855

Figura B-6: Footprint corrida 6



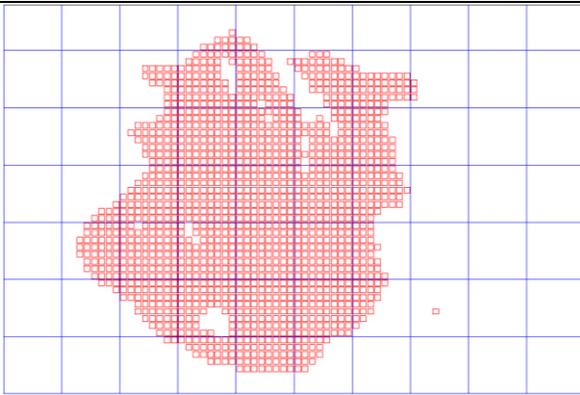
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
7	2,40	0,37	2.357	0,47	1.065	3.420	829

Figura B-7: Footprint corrida 7



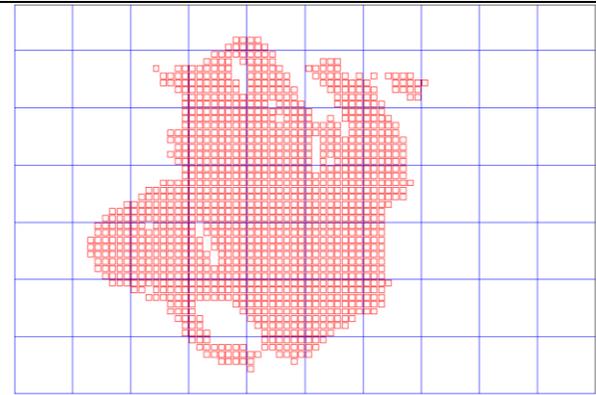
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
8	2,30	0,39	2.145	0,48	988	3.420	814

Figura B-8: Footprint corrida 8



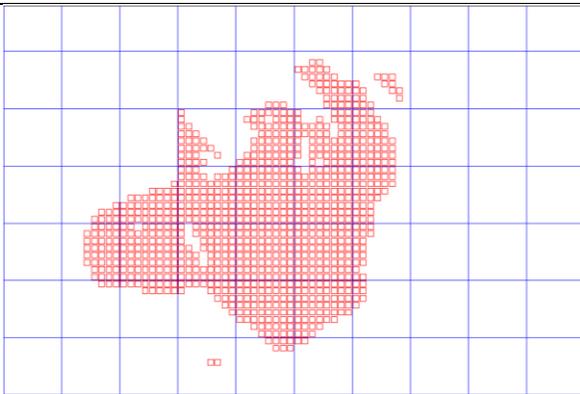
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
9	2,20	0,41	1.875	0,49	905	3.435	777

Figura B-9: Footprint corrida 9



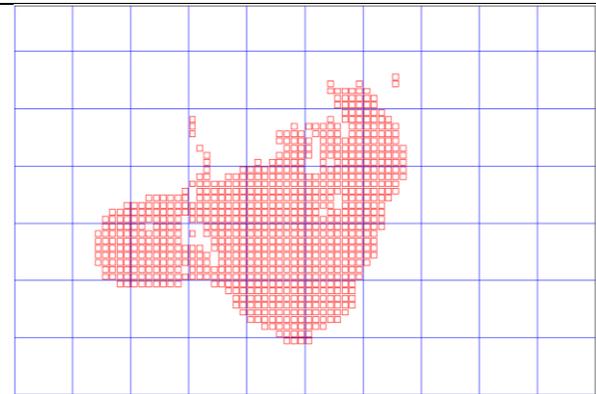
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
10	2,10	0,44	1.589	0,51	789	3.435	756

Figura B-10: Footprint corrida 10



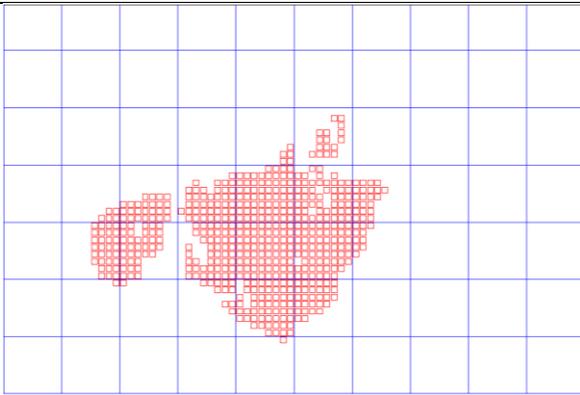
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
11	2,00	0,46	1.227	0,54	592	3.465	778

Figura B-11: Footprint corrida 11



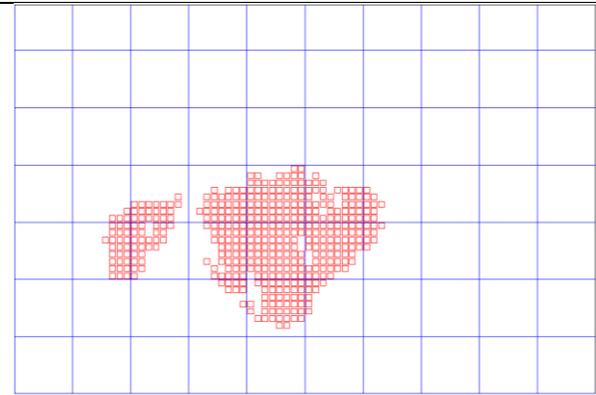
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
12	1,90	0,49	1.024	0,56	502	3.480	765

Figura B-12: Footprint corrida 12



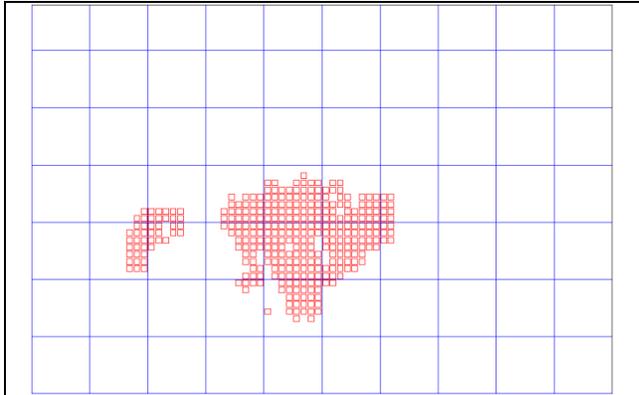
Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
13	1,80	0,53	715	0,60	354	3.540	757

Figura B-13: Footprint corrida 13



Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
14	1,70	0,57	531	0,63	267	3.555	747

Figura B-14: Footprint corrida 14



Corrida	Price Cu (US\$/lb)	Ley de corte CuEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media CuEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
15	1,60	0,61	382	0,66	209	3.600	687

Figura B-15: Footprint corrida 15

ANEXO C – EVALUACIÓN ECONÓMICA

El Gráfico C-1 da cuenta de los gastos de operación. Existen mínimas diferencias entre cada corrida por el hecho de que el requerimiento productivo es el mismo y el área a preparar es muy similar en el periodo de ramp-up y régimen, por lo que únicamente se observan diferencias en el periodo de ramp-down.

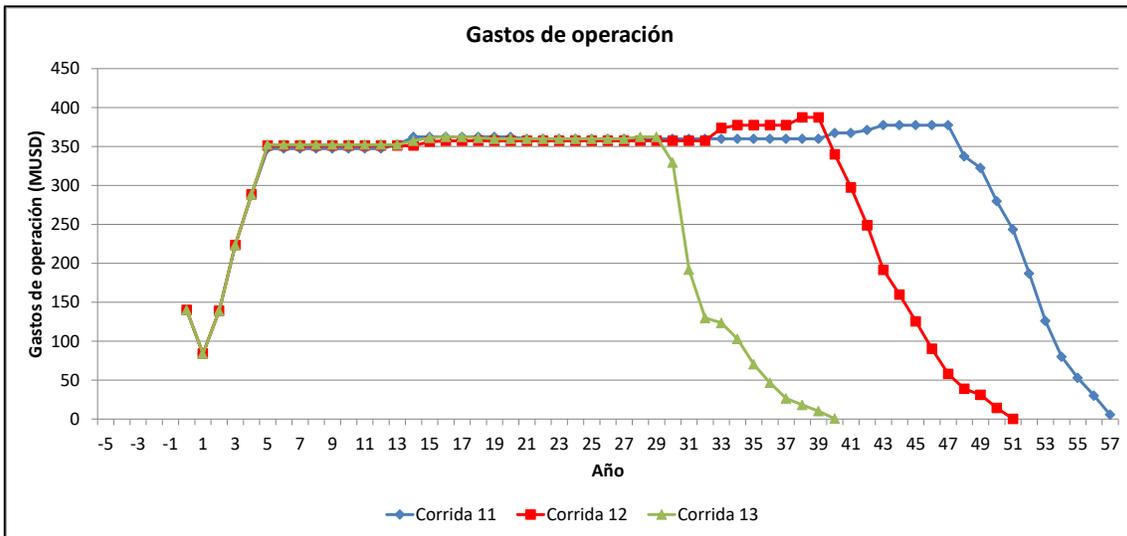


Gráfico C-1: Gastos de operación, Proyecto 1

El Gráfico C-2 representa las inversiones, destacándose el hecho de que gran parte de ellas son realizadas en forma previa al inicio de producción (año 1), principalmente las asociadas a la planta de procesos e infraestructura.

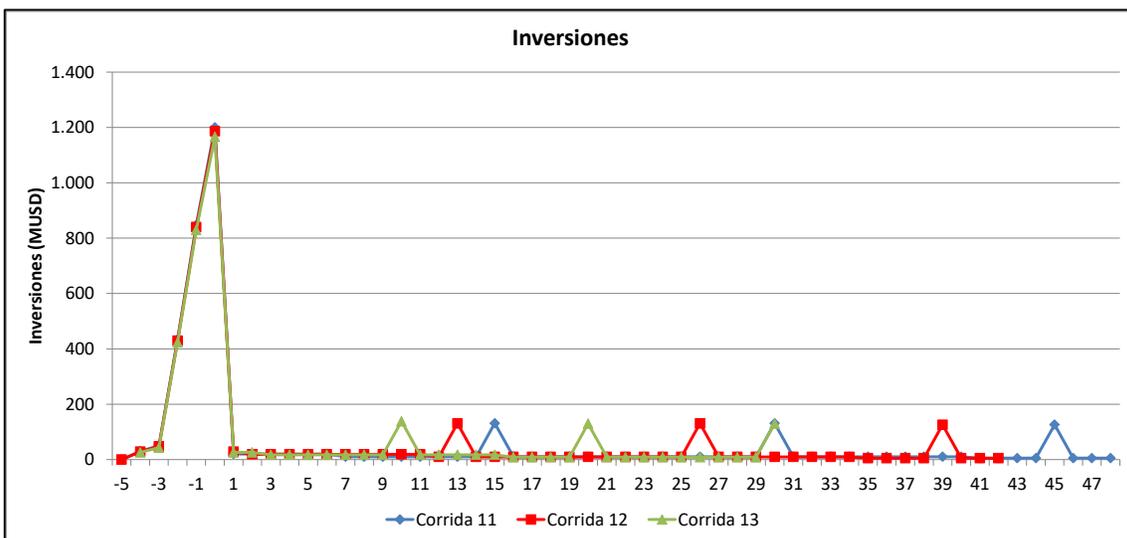


Gráfico C-2: Inversiones, Proyecto 1

El Gráfico C-3 da cuenta de los flujos netos, a partir de los cuales se calcula el VAN para cada corrida.

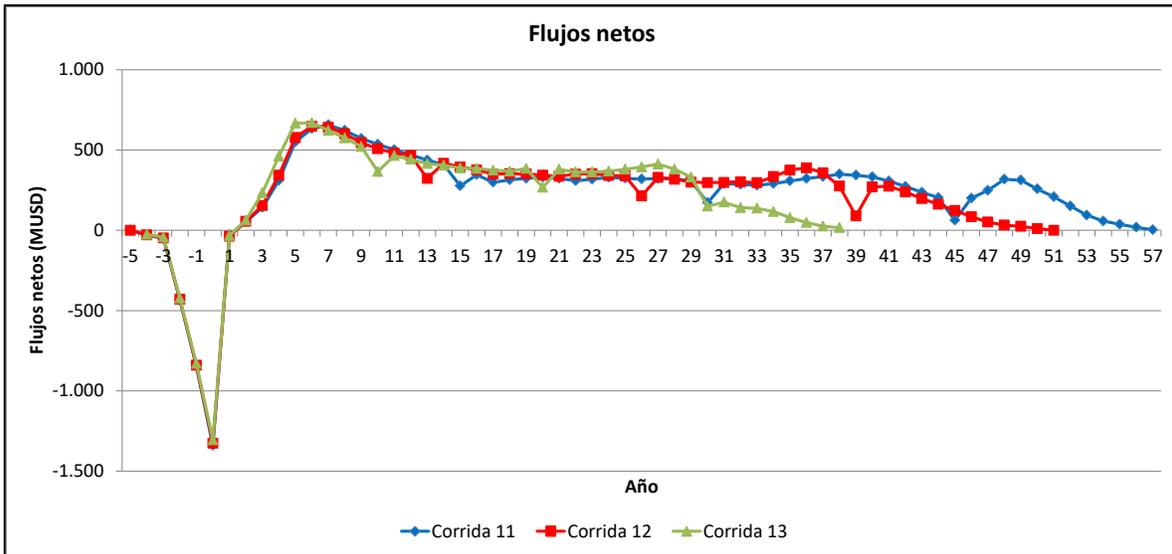


Gráfico C-3: Flujos netos, Proyecto 1

El Gráfico C-4 da cuenta de los gastos de operación. Existen mínimas diferencias entre cada corrida por el hecho de que el requerimiento productivo es el mismo y el área a preparar es muy similar en el periodo de ramp-up y régimen, diferenciándose en el periodo de ramp-down.

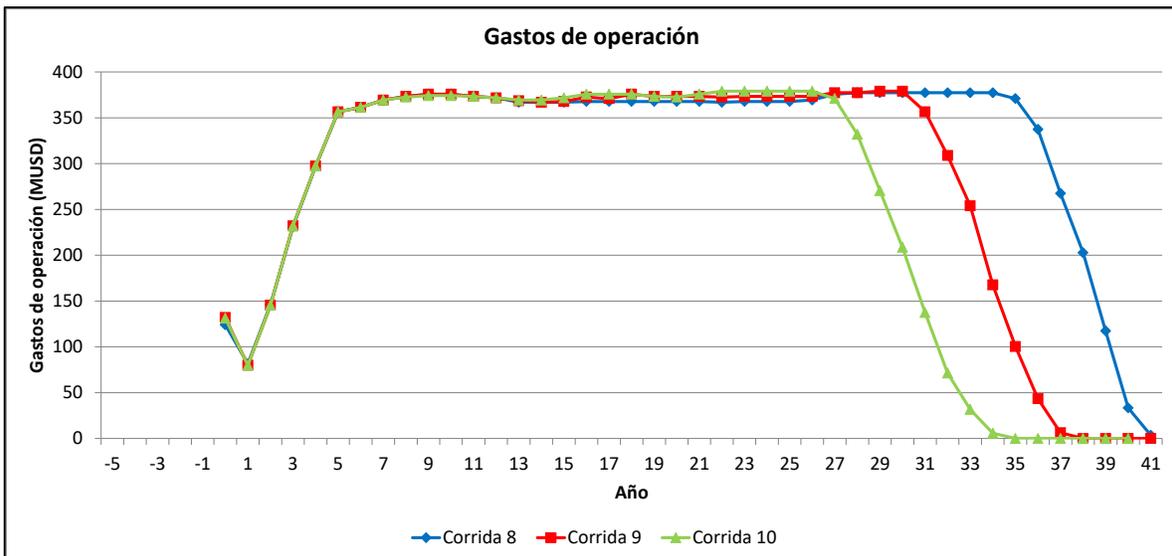


Gráfico C-4: Gastos de operación, Proyecto 2

El Gráfico C-5 representa las inversiones, destacándose el hecho de que gran parte de ellas son realizadas en forma previa al inicio de producción (año 1).

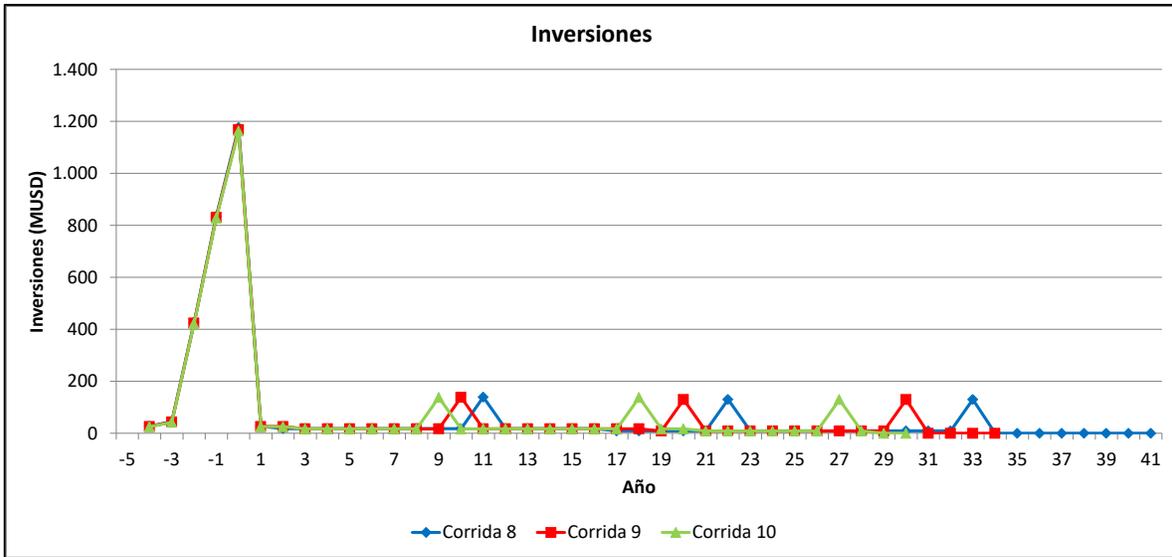


Gráfico C-5: Inversiones, Proyecto 2

El Gráfico C-6 da cuenta de los flujos netos, a partir de los cuales se calcula el VAN para cada corrida.

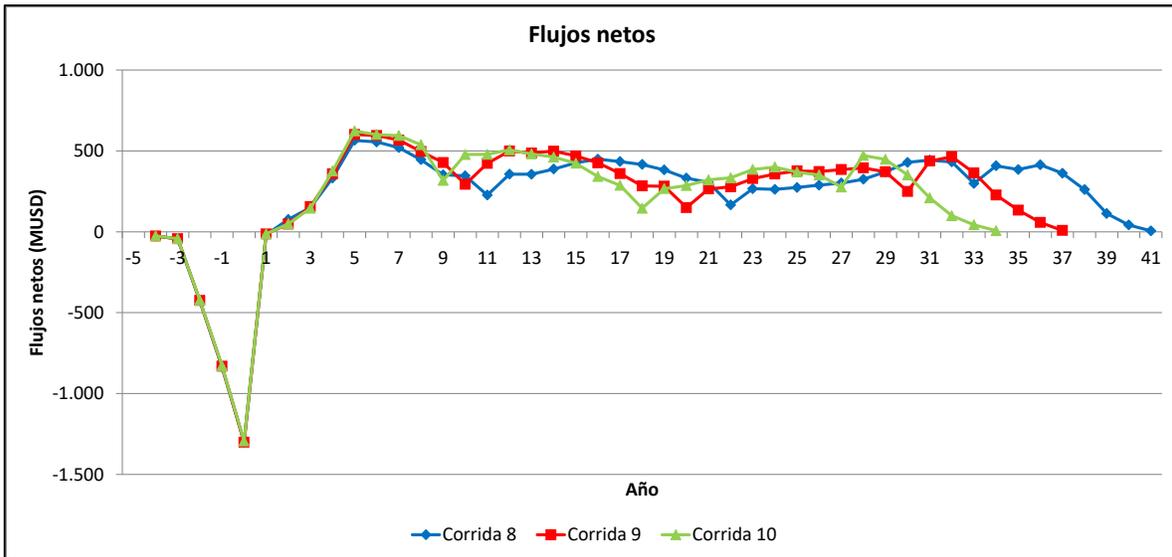


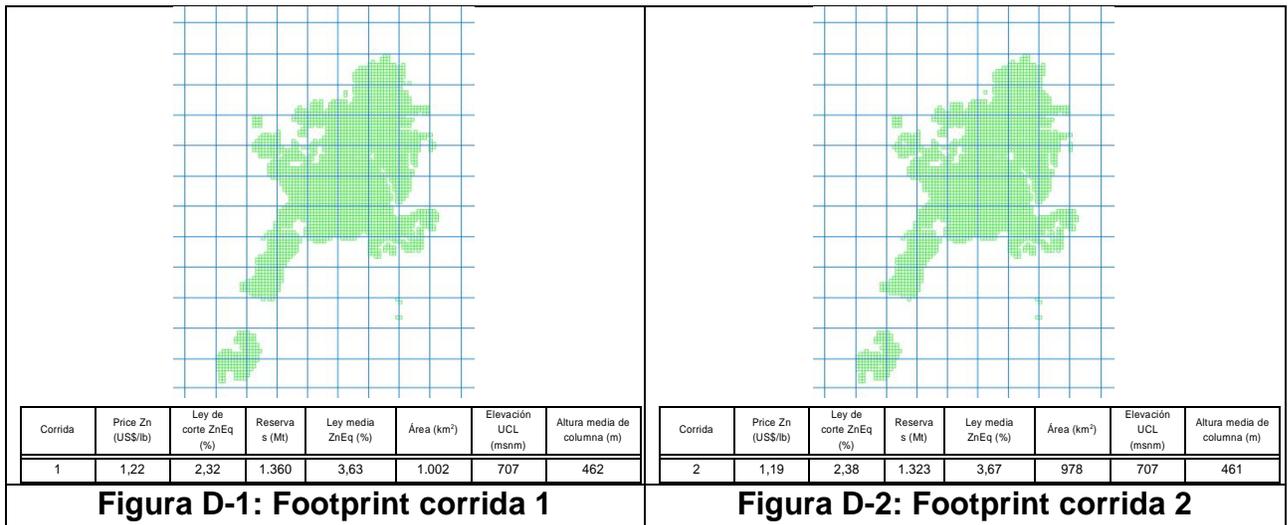
Gráfico C-6: Flujos netos, Proyecto 2

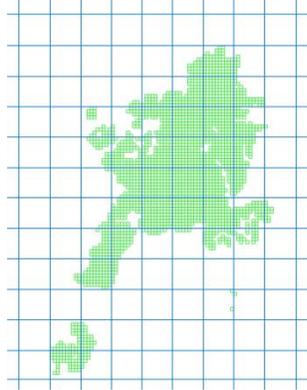
ANEXO D – FOOTPRINT MATEMÁTICO DE LAS 15 LEYES DE CORTE UTILIZADAS EN EL PROYECTO 2

En este Anexo se presentan 15 footprint matemáticos de corridas considerando las 15 leyes de corte de zinc equivalente utilizadas en el análisis del Proyecto 2. Adicionalmente, una tabla resumen de cada corrida es incluida con los siguientes parámetros:

- Número de la corrida.
- Precio Zn (USD/lb).
- Ley de corte de ZnEq (%).
- Reservas (Mt).
- Ley media ZnEq (%).
- Área (km²).
- Elevación UCL (msnm).
- Altura media de columna (m).

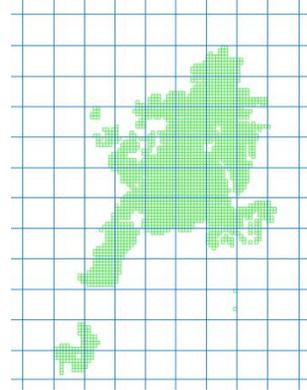
La grilla de color azul es de 200 m x 200 m y los bloques de color verde son de 20 m x 20 m.





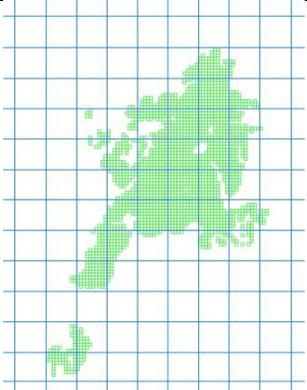
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
3	1,16	2,44	1.286	3,71	948	707	462

Figura D-3: Footprint corrida 3



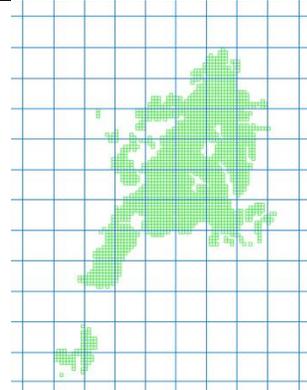
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
4	1,13	2,52	1.244	3,75	915	707	463

Figura D-4: Footprint corrida 4



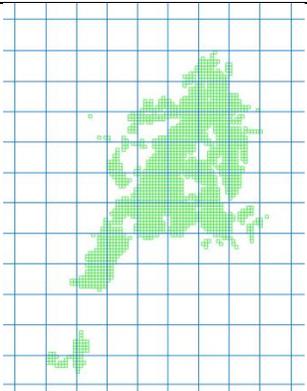
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
5	1,10	2,60	1.184	3,81	869	707	464

Figura D-5: Footprint corrida 5



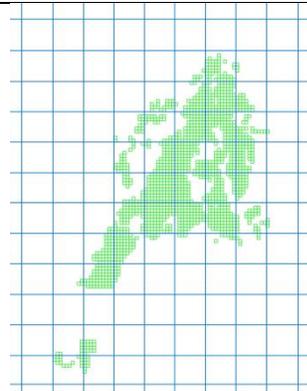
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
6	1,07	2,69	1.092	3,91	799	707	465

Figura D-6: Footprint corrida 6



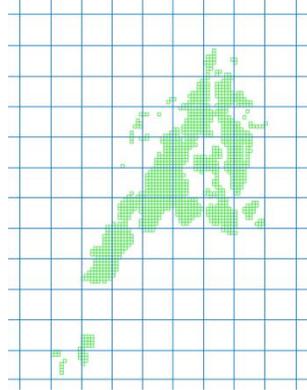
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
7	1,04	2,80	977	4,02	712	707	467

Figura D-7: Footprint corrida 7



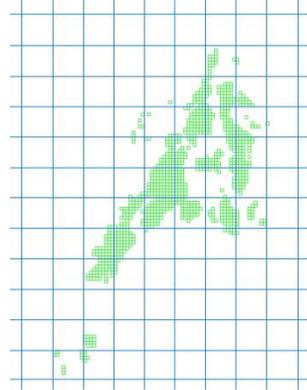
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
8	1,01	2,93	861	4,16	618	707	470

Figura D-8: Footprint corrida 8



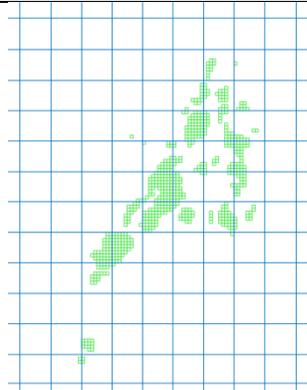
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
9	0,98	3,07	668	4,41	492	727	462

Figura D-9: Footprint corrida 9



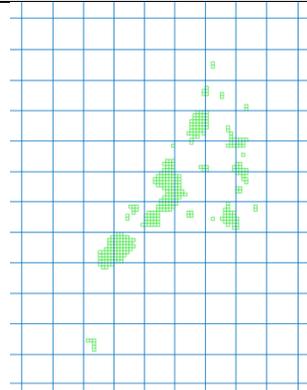
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
10	0,95	3,24	526	4,63	386	727	459

Figura D-10: Footprint corrida 10



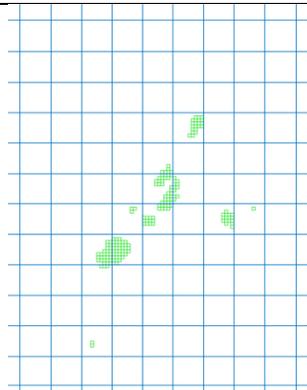
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
11	0,92	3,45	344	4,97	256	727	456

Figura D-11: Footprint corrida 11



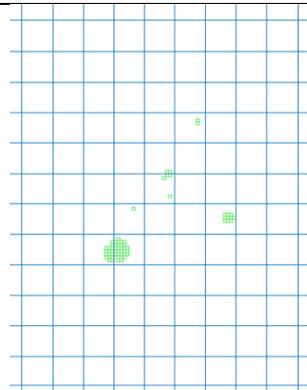
Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
12	0,89	3,71	189	5,48	146	747	441

Figura D-12: Footprint corrida 12



Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
13	0,86	4,03	90	6,11	71	747	429

Figura D-13: Footprint corrida 13



Corrida	Price Zn (US\$/lb)	Ley de corte ZnEq (%)	Reservas (Mt)	Ley media ZnEq (%)	Área (km ²)	Elevación UCL (msnm)	Altura media de columna (m)
14	0,83	4,44	31	7,00	26	727	408

Figura D-14: Footprint corrida 14

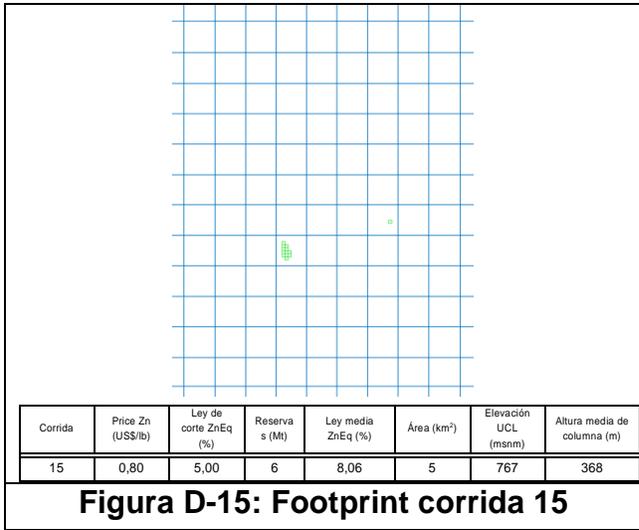


Figura D-15: Footprint corrida 15

ANEXO E – FOOTPRINT DE BENEFICIOS POR TONELADA, PROYECTO 2

En este anexo se grafican los beneficios por tonelada para las corridas 8, 9 y 10 del Proyecto 2, de acuerdo a la siguiente escala de colores (Ben = beneficio):

- Ben (USD/t) < 0
- $0 \leq \text{Ben (USD/t)} < 7$
- $7 \leq \text{Ben (USD/t)} < 14$
- $14 \leq \text{Ben (USD/t)} < 21$
- $21 \leq \text{Ben (USD/t)} < 28$
- Ben (USD/t) > 28

La secuencia de extracción fue realizada privilegiando comenzar por las zonas con mayor beneficio por tonelada.

La grilla de color azul es de 200 m x 200 m.

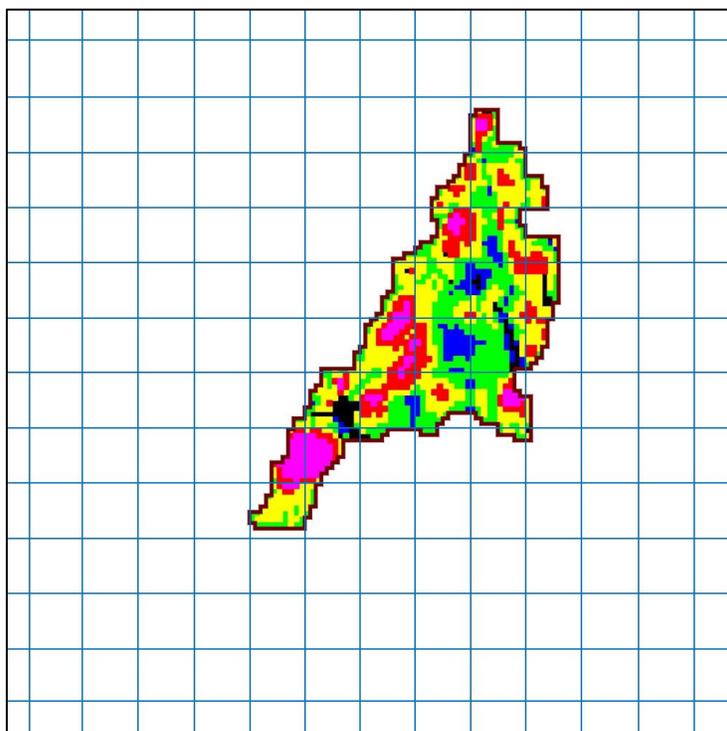


Figura E-1: Footprint de beneficios por tonelada, corrida 8

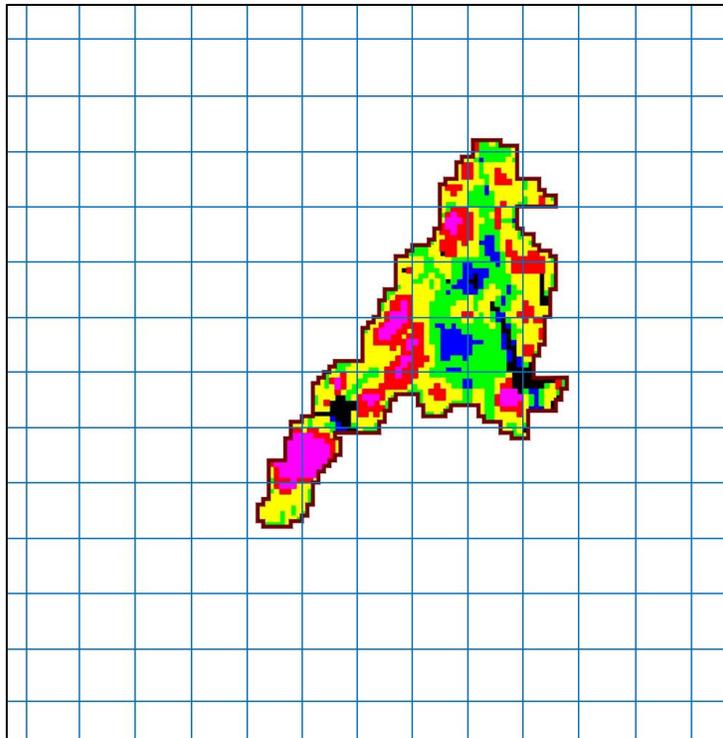


Figura E-2: Footprint de beneficios por tonelada, corrida 9

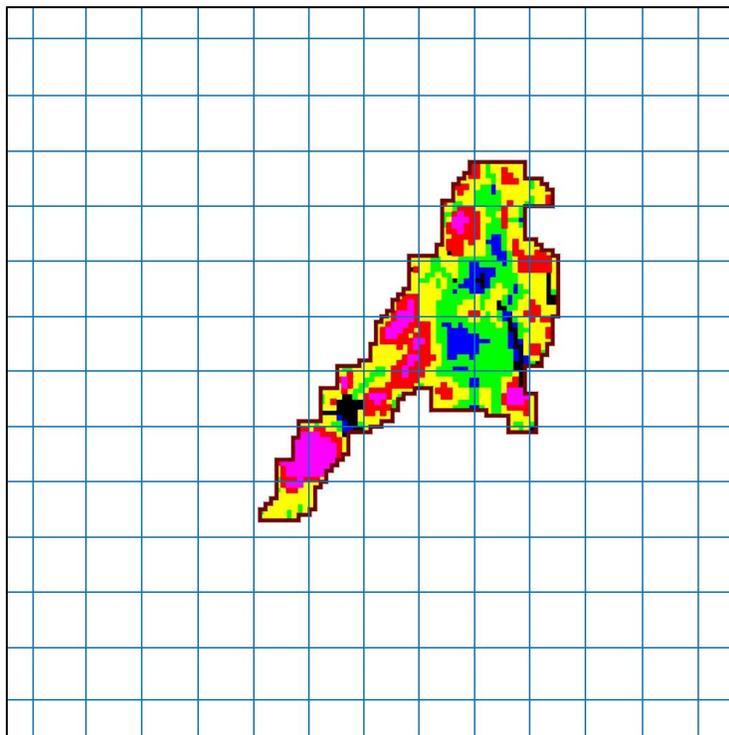


Figura E-3: Footprint de beneficios por tonelada, corrida 10

ANEXO F – ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El Gráfico F-1 y Gráfico F-2 dan a conocer la variación del VAN en función del costo mina para distintos ritmos de producción, únicamente para la corrida 13 (Proyecto 1) y corrida 10 (Proyecto 2) que son las que tienen el mayor VAN. Se observa claramente una tendencia lineal.

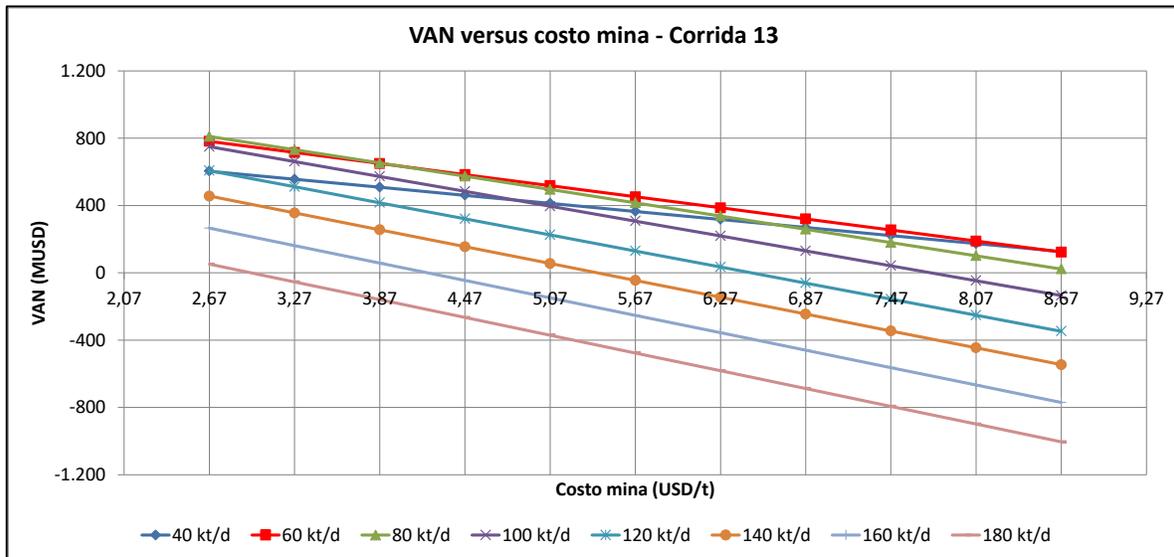


Gráfico F-1: Análisis de sensibilidad costo mina para distintos ritmos de producción, Proyecto 1

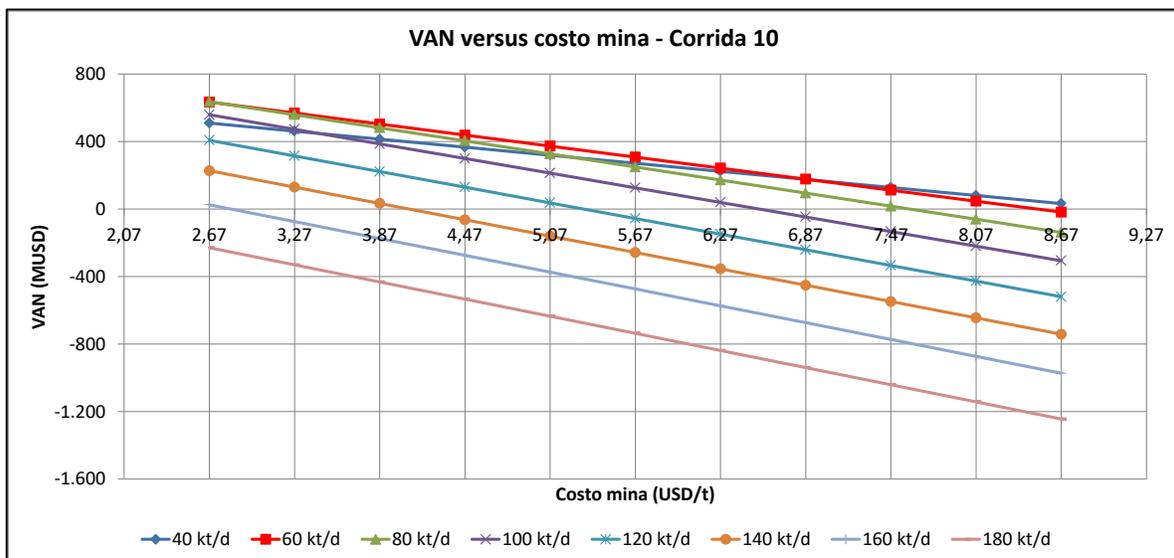


Gráfico F-2: Análisis de sensibilidad costo mina para distintos ritmos de producción, Proyecto 2

El Gráfico F-3 y Gráfico F-4 dan cuenta de la variación del VAN en función de la tasa de descuento para distintos ritmos de producción, únicamente para la corrida 13 (Proyecto 1) y corrida 10 (Proyecto 2) que son las que tienen el mayor VAN, donde se observa una dependencia no lineal.

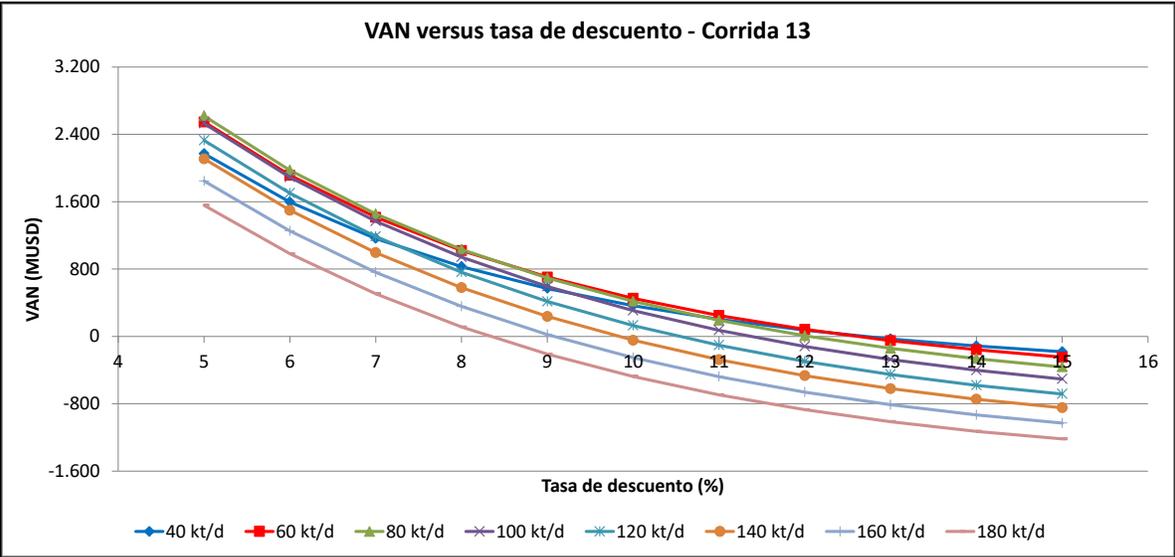


Gráfico F-3: Análisis de sensibilidad tasa de descuento para distintos ritmos de producción, Proyecto 1

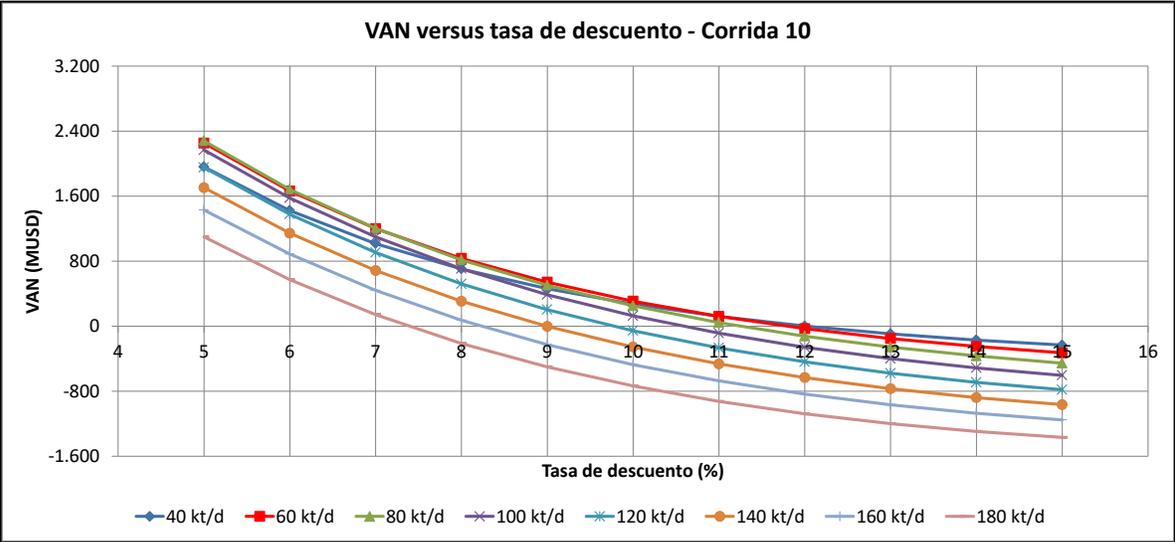


Gráfico F-4: Análisis de sensibilidad tasa de descuento para distintos ritmos de producción, Proyecto 2

El Gráfico F-5 y Gráfico F-6 dan a conocer la variación del VAN en función del precio del cobre y zinc respectivamente para distintos ritmos de producción, únicamente para la corridas que entregan el mayor VAN. Se observa claramente una tendencia lineal.

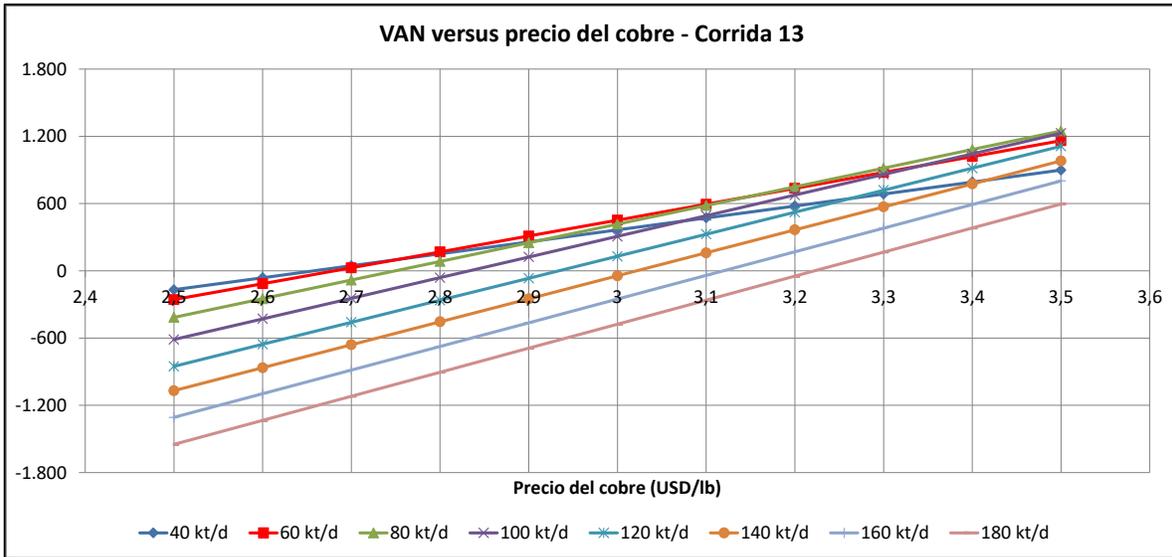


Gráfico F-5: Análisis de sensibilidad precio del cobre para distintos ritmos de producción, Proyecto 1

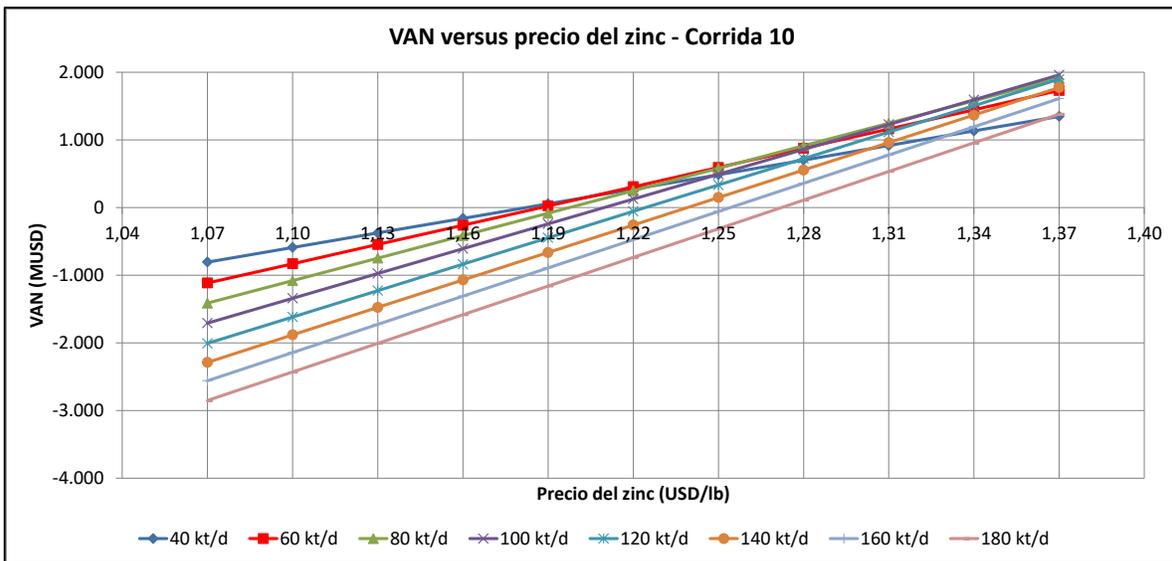


Gráfico F-6: Análisis de sensibilidad precio del zinc para distintos ritmos de producción, Proyecto 2