

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Optimización del VAN de un proyecto minero subterráneo
utilizando un cut off y ritmo de producción considerando la
variabilidad dinámica de los parámetros en el tiempo**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Gianfranco Luis Pizarro Valle

 [0009-0003-3704-4517](https://orcid.org/0009-0003-3704-4517)

Asesor

M.Sc. Roberto Fernando Maldonado Astorga

 [0009-0001-5106-7585](https://orcid.org/0009-0001-5106-7585)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Pizarro Valle [1]
Referencia/Reference	[1] G. Pizarro Valle, " <i>Optimización del VAN de un proyecto minero subterráneo utilizando un cut off y ritmo de producción considerando la variabilidad dinámica de los parámetros en el tiempo</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Pizarro, 2025)
Referencia/Reference	Pizarro, G. (2025). <i>Optimización del VAN de un proyecto minero subterráneo utilizando un cut off y ritmo de producción considerando la variabilidad dinámica de los parámetros en el tiempo</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi madre, Alicia Valle, por su apoyo incondicional, mi ejemplo de lucha y dedicación. Esta tesis es para ti, como muestra de todo lo que me has inspirado a lograr.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por guiarme, darme fortaleza y permitirme alcanzar este objetivo. Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ing. Roberto Maldonado por su invaluable guía y asesoría durante la elaboración de esta tesis. También agradezco a Agnitia Consultores SAC, por brindarme la oportunidad de adquirir valiosa experiencia en proyectos mineros; las lecciones aprendidas en esta etapa han sido fundamentales para el avance de mi carrera y la realización de esta tesis. Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, y a la Escuela de Minas por su apoyo en mi formación académica.

Resumen

Actualmente, las empresas mineras con proyectos y/u operaciones subterráneas no están optimizando sus beneficios y probablemente están perdiendo la oportunidad de generar valor a los accionistas. En este contexto, la selección del cut off y el ritmo de producción y es crucial, ya que impacta directamente en el Valor Actual Neto (VAN), y con ello, en la viabilidad y rentabilidad de cualquier proyecto.

Para llevar a cabo la optimización del cut off y el ritmo de producción, es esencial analizar la relación entre el VAN y las variables críticas mencionadas. La metodología de Hill of Value (HoV) emerge como herramienta para estimar el VAN en función de estas variables. Sin embargo, la metodología HoV tradicional considera ciertas simplificaciones que generan resultados no del todo satisfactorios.

Este trabajo de investigación busca mejorar la metodología existente para obtener resultados más confiables en cuanto a la obtención de valores de cut off y ritmo de producción con el objetivo de optimizar el VAN de un proyecto de mina subterránea de oro que explota el yacimiento mediante el método de taladros largos en su variante Bench and Fill. Se realizará, además, una comparación de los resultados obtenidos con el enfoque utilizado en el estudio de prefactibilidad (Modelo Breakeven cut off), la metodología HoV tradicional y la metodología propuesta de HoV mejorada. Finalmente, se presentarán las conclusiones de esta comparación, resaltando las diferencias clave entre las metodologías evaluadas y sus implicancias para optimizar el VAN.

En el proyecto minero subterráneo, la metodología HoV mejorada arroja resultados de optimización de VAN que difieren aproximadamente en un 10% respecto a lo estimado por el plan minero, destacándose por su simplicidad, ajuste y rapidez de implementación lo que refuerza la efectividad de la mejora propuesta.

Palabras clave — VAN, Cut Off, Hill of Value, OPEX, CAPEX, Breakeven, Bench and Fill.

Abstract

Currently, mining companies with underground projects and/or operations are not optimizing their profits and are likely missing the opportunity to generate value for shareholders. In this context, the selection of the cut off value and production rate is crucial, as it directly impacts the Net Present Value (NPV), and thus the viability and profitability of any project.

To carry out the optimization of the cut off value and production rate, it is essential to analyze the relationship between the NPV and the critical variables mentioned. The Hill of Value (HoV) methodology emerges as a tool to estimate the NPV based on these variables. However, the traditional HoV methodology includes certain simplifications that result in less than satisfactory outcomes.

This research aims to improve the existing methodology to obtain more reliable results regarding the cut off value and production rate, with the goal of optimizing the NPV of an underground gold mining project that exploits the deposit using the Long Hole Sublevel Stopping method, in its Bench and Fill variant. Additionally, a comparison of the results obtained will be made with the approach used in the prefeasibility study (Breakeven cut off model), the traditional HoV methodology, and the proposed improved HoV methodology. Finally, the conclusions of this comparison will be presented, highlighting the key differences between the evaluated methodologies and their implications for optimizing the NPV.

In the underground mining project, the improved HoV methodology yields optimization results for NPV that differ by approximately 10% compared to those estimated by the mine plan. It stands out for its simplicity, accuracy, and speed of implementation, which reinforces the effectiveness of the proposed improvement.

Keywords — VAN, Cut Off, Hill of Value, OPEX, CAPEX, Breakeven, Bench and Fill.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xviii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Justificación e importancia de la investigación.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Hipótesis	6
1.5.1 Hipótesis general.....	6
1.5.2 Hipótesis específicas.....	6
1.6 Antecedentes referenciales	7
1.6.1 Antecedentes internacionales.....	7
1.6.2 Antecedentes nacionales	9
1.7 Alcance del proyecto	10
1.7.1 Desarrollo y aplicación de la metodología mejorada.....	11
1.7.2 Determinación del cut off óptimo	11
1.7.3 Selección del ritmo de producción óptimo	11
1.7.4 Modelo estocástico para evaluación de riesgo	11
1.7.5 Comparación de resultados.....	11
1.7.6 Propuesta de estrategias para optimización del VAN del proyecto	12
1.8 Variables e indicadores de la investigación	12

1.8.1	Variable dependiente.....	12
1.8.2	Variables independientes	12
1.8.3	Indicadores.....	13
1.9	Diseño metodológico	14
1.9.1	Tipo de investigación.....	14
1.9.2	Métodos de investigación	14
1.9.3	Diseño de investigación.....	14
1.9.4	Técnicas e instrumentación en recolección de datos.....	14
1.9.5	Población	15
1.10	Matriz de consistencia: Articulación técnico-económica	15
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....		18
2.1	Marco teórico.....	18
2.1.1	Metodología Hill of Value.....	18
2.1.2	Recursos y reservas minerales	28
2.1.3	Factores modificadores operativos	32
2.1.4	Valor punto.....	32
2.1.5	Precio del metal.....	33
2.1.6	Parámetros metalúrgicos.....	33
2.1.7	Net smelter return (NSR).....	34
2.1.8	Utilidad operativa.....	35
2.1.9	Cut off	36
2.1.10	Método de minado.....	39
2.1.11	Tajeo por taladros largos (Bench and Fill)	40
2.1.12	Recuperación minera	46
2.1.13	Dilución de mineral.....	46
2.1.14	Ritmo de producción (ROP).....	50
2.1.15	Regla de Taylor	51
2.1.16	Plan minero	51

2.1.17	Costo de operación (OPEX)	52
2.1.18	Costo de capital (CAPEX)	52
2.1.19	Estimación de costos de operación y capital	53
2.1.20	Valor actual neto (VAN).....	55
2.1.21	Índice de valor actual neto (IVAN)	56
2.1.22	Tasa interna de retorno (TIR)	57
2.1.23	Evaluación de proyectos con riesgo e incertidumbre	58
2.1.24	Variables aleatorias	59
2.1.25	Método de simulación Montecarlo	67
2.2	Marco conceptual	70
2.2.1	Tajeo	70
2.2.2	Ley	71
2.2.3	Producción	71
2.2.4	Secuencia	71
2.2.5	Valor de mineral	71
2.2.6	Escenario	71
2.2.7	Simulación.....	71
2.2.8	Optimización	72
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		73
3.1	Recolección y procesamiento de datos	73
3.1.1	Descripción del proyecto	73
3.1.2	Datos recolectados del proyecto	74
3.1.3	Procesamiento de datos e inputs calculados.....	82
3.2	Aplicación metodológica comparativa HoV	92
3.2.1	Metodología Hill of Value (HoV)	93
3.2.2	Metodología Hill of Value mejorada	95
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		103
4.1	Resultados del caso Base	105

4.2	Resultados del caso B – Hill of Value	108
4.2.1	Definición de variables para optimización del caso B	108
4.2.2	Metodología Hill of Value para el caso B	110
4.2.3	Selección de reservas para el caso B.....	110
4.2.4	Aplicación del Hill of Value	115
4.3	Resultados del caso C – Hill of Value mejorado	123
4.3.1	Definición de variables para optimización del caso C	123
4.3.2	Metodología Hill of Value mejorada para el caso C	126
4.3.3	Selección de reservas para el caso C	126
4.3.4	Aplicación del Hill of Value mejorado.....	132
4.3.5	Aplicación del modelo estocástico para decisión de ritmo de producción	147
4.4	Resultados de planes mineros	164
4.5	Análisis comparativo de metodologías para la selección del cut off y ritmo de producción óptimos.....	168
4.6	Contrastación de hipótesis	171
4.6.1	Formulación de hipótesis nula	171
4.6.2	Aplicación de la prueba t de student para muestras relacionadas	173
4.6.3	Decisión estadística sobre la Hipótesis.....	174
	Conclusiones	175
	Recomendaciones	182
	Referencias bibliográficas	184

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	17
Tabla 2 : Condiciones geomecánicas para tajeos por taladros largos.....	41
Tabla 3 : Resumen de decisiones basadas en el valor de VAN	56
Tabla 4 : Resumen de decisiones basadas en el valor de TIR.....	58
Tabla 5 : Geometría del modelo de bloques	75
Tabla 6 : Inventario de recurso mineral y leyes de Au y Ag según modelo de bloques ..	75
Tabla 7 : Precios y términos de venta de los metales	77
Tabla 8 : Valores punto.....	77
Tabla 9 : Recuperación metalúrgica de Au (%).....	79
Tabla 10: Recuperación metalúrgica de Ag (%).....	79
Tabla 11: Parámetros utilizados para generación de reservas.....	81
Tabla 12: Resumen de datos Capex y Opex en proyectos mineros tipo	85
Tabla 13: Función matemática exponencial para estimación de CAPEX y OPEX.....	87
Tabla 14: Estimación de CAPEX y OPEX para diferentes ritmos de producción.....	88
Tabla 15: Comparación cualitativa entre las metodologías HoV Tradicional y Mejorada para la estimación del VAN.....	97
Tabla 16: Cut off marginal y cut off económico, Caso Base	106
Tabla 17: Reservas seleccionadas para valores de cut off, caso B.....	111
Tabla 18: Resumen de valores VAN (M US\$), 783 escenarios, caso B	116
Tabla 19: Variables seleccionadas para obtener HoV, caso B.....	117
Tabla 20: Valores de VAN para diferentes cut off, caso B.....	119
Tabla 21: Valores de VAN para diferentes valores de ROP's para cut off óptimo, caso B	122
Tabla 22: Indicadores financieros para ROP y cut off óptimo, caso B.....	123
Tabla 23: Reservas seleccionadas para valores de cut off, caso C.....	127
Tabla 24: Resumen de valores VAN (M US\$), 783 escenarios, caso C	133

Tabla 25: Variables seleccionadas para obtener HoV, caso C.....	134
Tabla 26: Valores de VAN para diferentes cut off, caso C	136
Tabla 27: Valores VAN (M US\$) para sensibilidad del precio del Au, caso C.....	139
Tabla 28: Valores de VAN para diferentes valores de ROP's para cut off óptimo, caso C	142
Tabla 29: Indicadores financieros para diferentes valores ROP's para cut off óptimo, caso C	143
Tabla 30: Consenso para selección de distribución de probabilidad ajustada de cada variable	147
Tabla 31: Ratio “cotización metal Au/ cotización metal Ag”	150
Tabla 32: Probabilidades de riesgo para los ritmos de producción en evaluación.....	162
Tabla 33: Reporte de reservas, optimo del proyecto, caso C.....	164
Tabla 34: Resultados de planificación minera para el caso base y los casos óptimos (HoV tradicional y HoV mejorado)	165
Tabla 35: VAN estimado en base a planes mineros.....	168
Tabla 36: Comparación del VAN para las metodologías HoV, HoV mejorado y plan minero	169
Tabla 37: Comparación de parámetros estratégicos entre metodologías HoV y HoV mejorado.....	170
Tabla 38: Resumen de errores absolutos HoV tradicional y HoV mejorado	173

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Curva hipotética VAN vs cut off.....	20
Figura 2 : Curva hipotética VAN vs ritmo de producción	21
Figura 3 : Típica grafica HoV para valores VAN vs cut off y ritmo de producción	24
Figura 4 : Típica grafica HoV mostrando un típico proyecto minero no optimizado	25
Figura 5 : Típica grafica HoV mostrando una típica estrategia de mejora	26
Figura 6 : Típica grafica HoV mostrando la óptima estrategia que optimiza el VAN	28
Figura 7 : Clasificación de recursos y reservas minerales.....	31
Figura 8 : Vista planta de diseño mina para explotación del método B&F	41
Figura 9 : Vista sección de diseño mina para explotación del método B&F.....	42
Figura 10: Ciclo de minado del método para la explotación del método B&F.....	45
Figura 11: Esquema de dilución interna	48
Figura 12: Esquema de dilución externa por descaje.....	49
Figura 13: Esquema de dilución externa por limpieza y efecto shotcrete	50
Figura 14: Curva modelo de factor de economía de escala, inversiones vs capacidad diaria	55
Figura 15: Función de probabilidad para variable discreta	60
Figura 16: Función de distribución acumulada para variable discreta	60
Figura 17: Función de distribución acumulada para variable continua	61
Figura 18: Función de densidad de probabilidad para variable continua	62
Figura 19: Variable aleatoria Equiprobable	63
Figura 20: Variable aleatoria triangular	64
Figura 21: Variable aleatoria Normal.....	65
Figura 22: Variable aleatoria Lognormal	66
Figura 23: Variable aleatoria Beta.....	67
Figura 24: Curva modelo de perfil de riesgo de un proyecto simulado	70

Figura 25: Vista longitudinal de los sólidos de las estructuras y modelo de bloques del proyecto	76
Figura 26: Vista longitudinal de los sólidos de las estructuras y modelo de bloques del proyecto con leyes de Au (g/t)	76
Figura 27: Curva de recuperación metalurgia versus ley de Au, en base a formulas geometalúrgicas	78
Figura 28: Curva de recuperación metalurgia versus ley de Ag, en base a formulas geometalúrgicas	80
Figura 29: Flujograma de estimación de reservas minerales	84
Figura 30: Curva de ajuste exponencial de CAPEX Mina	85
Figura 31: Curva de ajuste exponencial de CAPEX Planta	86
Figura 32: Curva de ajuste exponencial de CAPEX Planta	86
Figura 33: Curva de ajuste exponencial de OPEX	86
Figura 34: CAPEX Mina vs Ritmo de producción diario	89
Figura 35: CAPEX Planta vs Ritmo de producción diario	89
Figura 36: CAPEX Infraestructura vs Ritmo de producción diario	90
Figura 37: Sustaining CAPEX mina vs Ritmo de producción diario	90
Figura 38: Sustaining CAPEX planta vs Ritmo de producción diario	91
Figura 39: OPEX vs Ritmo de producción diario	91
Figura 40: Metodología Breakeven cut off para valorización de un negocio minero	93
Figura 41: Metodología HoV para valorización de un negocio minero.....	94
Figura 42: Estrategias para metodología HoV Mejorada	96
Figura 43: Metodología HoV mejorada para valorización de un negocio minero	97
Figura 44: Perfil de producción ROP Base: 1,600 tpd, caso Base.....	107
Figura 45: Curva tonelaje de reservas vs cut off, caso B	112
Figura 46: Vista longitudinal de reservas para la estimación 01, caso B	113
Figura 47: Vista longitudinal de reservas para la estimación 29, caso B	113
Figura 48: Perfil de producción y NSR – Escenario 07, caso B.....	114

Figura 49: Perfil de ventas, inversiones y Opex – Escenario 07, caso B	114
Figura 50: Iso-superficie de valores de VAN, caso B	115
Figura 51: Iso-superficie de valores VAN>0, Hill of Value, caso B	117
Figura 52: Curva VAN vs cut off, para obtención de valor óptimo de cut off, caso B	118
Figura 53: Iso-superficie de valores VAN>0, HoV intersectada con plano CO22B, caso B	120
Figura 54: Curva VAN vs ritmo de producción, para valor óptimo de ROP, caso B.....	121
Figura 55: Perfil de producción ROP24 óptimo: 2,900 tpd, caso B.....	123
Figura 56: Curva tonelaje de reservas vs cut off, caso C	128
Figura 57: Vista longitudinal reservas para la estimación 01, caso C.....	128
Figura 58: Vista longitudinal reservas para la estimación 29, caso C.....	129
Figura 59: Vista longitudinal, selección de nivel de explotación, escenario 01, caso C .	130
Figura 60: Perfil de producción y NSR medio – Escenario 07, caso C	131
Figura 61: Perfil de ventas, inversiones y Opex, Escenario 07, caso C.....	131
Figura 62: Iso-superficie de valores VAN, caso C	132
Figura 63: Iso-superficie de valores VAN>0, Hill of Value mejorado, caso C.....	134
Figura 64: Curva VAN vs cut off, para obtención de valor óptimo de cut off, caso C	135
Figura 65: Sensibilidad del cut off con respecto a la tasa de descuento, VAN>0, caso C	137
Figura 66: Sensibilidad del cut off con respecto al precio del Au, VAN>0, caso C.....	138
Figura 67: Riesgos y beneficios en sensibilidad del precio del Au, caso C.....	139
Figura 68: Iso-superficie de valores VAN>0, HoV intersectada con plano CO17c, caso C	140
Figura 69: Curva VAN vs ritmo de producción, para valor optimo de ritmo de producción, caso C.....	141
Figura 70: Perfiles de producción seleccionados para elección de ROP optimo, caso C	143
Figura 71: Comparativo de curvas HoV mayor VAN y HoV mejorado, caso C	144

Figura 72: Ploteo de valores VAN vs IVAN, caso C	145
Figura 73: Perfil de producción para ROP: 2,100tpd, caso C	145
Figura 74: Perfil de producción para ROP: 3,100tpd, caso C	146
Figura 75: Plot de cut off vs ROP vs años de vida, HoV mejorado.....	146
Figura 76: Distribución de probabilidad ajustada para el tonelaje de producción (ROP: 2,100 tpd)	148
Figura 77: Distribución de probabilidad ajustada para el tonelaje de producción (ROP: 3,100 tpd)	149
Figura 78: Distribución de probabilidad ajustada para el precio del Au	150
Figura 79: Distribución de probabilidad ajustada para ley de Au	151
Figura 80: Distribución de probabilidad ajustada para ley de Ag	152
Figura 81: Distribución de probabilidad ajustada para dilución externa (%)	153
Figura 82: Distribución de probabilidad ajustada para Opex al ROP:2,100tpd	154
Figura 83: Distribución de probabilidad ajustada para Opex al ROP:3,100tpd	155
Figura 84: Distribución de probabilidad ajustada para Capex al ROP:2,100tpd	156
Figura 85: Distribución de probabilidad ajustada para Capex al ROP:3,100tpd	157
Figura 86: Distribución de probabilidad ajustada para Sustaining Capex al ROP: 2,100tpd.....	158
Figura 87: Distribución de probabilidad ajustada para Sustaining Capex al ROP: 3,100tpd	159
Figura 88: Distribución de probabilidad del VAN a 2,100tpd	160
Figura 89: Distribución acumulada del VAN a 2,100tpd	160
Figura 90: Distribución de probabilidad del VAN a 3,100tpd	161
Figura 91: Distribución acumulada del VAN a 3,100tpd	161
Figura 92: Curvas de perfiles de riesgo para los ritmos de producción en evaluación...	163
Figura 93: Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso Base	165
Figura 94: Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso B (óptimo HoV Tradicional)	166

Figura 95: Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso C (óptimo HoV Mejorado)	166
Figura 96: Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso Base	167
Figura 97: Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso B (optimo HoV Tradicional).....	167
Figura 98: Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso C (optimo HoV Mejorado)	168
Figura 99: Resumen de valores VAN vs NSR cut off, según metodología	170
Figura 100: Distribución t de Student – Hipótesis general.....	174

Introducción

En el contexto de la minería subterránea, la optimización de procesos resulta clave para maximizar el valor económico de los proyectos y garantizar su viabilidad a largo plazo. Sin embargo, la mayoría de las empresas mineras con proyectos y/u operaciones subterráneas no están aprovechando al máximo su potencial de generación de beneficios, lo que se traduce en una pérdida de valor para a los accionistas. Por ello, la adecuada selección del cut off y el ritmo de producción se vuelve fundamental, ya que ambos factores influyen directamente en el Valor Actual Neto (VAN), que impacta significativamente a la viabilidad y rentabilidad de cualquier proyecto.

Para llevar a cabo la adecuada selección del cut off y el ritmo de producción, es importante analizar la interacción entre las variables críticas y el VAN.

La metodología Hill of Value (HoV) es una herramienta valiosa para este propósito, al proporcionar un enfoque estructurado para la planificación y toma de decisiones estratégicas. No obstante, la metodología HoV tradicional considera ciertas simplificaciones que pueden llevar a generar resultados que no alcancen valores óptimos.

La presente investigación se enfoca en la aplicación y mejora de la metodología HoV en el contexto de un proyecto minero subterráneo dedicado a la extracción de oro, utilizando el método de explotación por Tajeo con Taladros Largos, específicamente en la variante Bench and Fill (B&F). Este método ha sido seleccionado por su adecuada adaptación a las características del yacimiento, permitiendo una explotación eficiente y segura, lo que resulta en la optimización de los parámetros económicos y operativos del proyecto.

El trabajo de investigación también busca determinar el cut off y ritmo de producción del proyecto para obtener resultados más precisos y confiables, con el objetivo de maximizar el VAN del proyecto para lo cual se utilizará la metodología HoV existente con algunas mejoras.

En el estudio de prefactibilidad realizado para el proyecto de investigación, se obtuvo un VAN de 24.47M US\$, basado en un cut off de 115 US\$/t, utilizando el enfoque Breakeven cut off y la fórmula de Taylor para seleccionar un ritmo de producción de 1,600tpd. Estos resultados servirán como referencia para la comparación con la metodología HoV mejorada.

Se espera que la metodología mejorada genere variaciones de no más de un 10% en el VAN respecto a las estimaciones de un plan minero, esta metodología mejorada destaca por su simplicidad, ajuste e implementación rápida. Además, al aplicar esta metodología, se concluye que la utilización de valores de cut off superiores al cut off económico generando un incremento considerable en el VAN, lo que refuerza la efectividad de la mejora propuesta.

A través de un análisis riguroso del VAN y la identificación de variables claves, como el cut off y el ritmo de producción, la investigación no solo incorpora la metodología tradicional del HoV, sino que también propone una versión mejorada que aborda las limitaciones inherentes a la metodología tradicional. Integrando factores como la variabilidad en la capacidad de producción, la ley media y el perfil de inversiones en el tiempo, la limpieza de reservas y una recuperación minera inferior al 100%, junto con un modelo económico estocástico, se espera ofrecer soluciones prácticas y efectivas que fortalezcan la toma de decisiones en el ámbito minero.

El análisis de escenarios óptimos en el contexto de esta investigación permitirá establecer un marco de comparación entre las metodología tradicional y mejorada, facilitando así una evaluación integral de su impacto en la maximización del VAN y la TIR. De esta manera, se contribuirá al conocimiento y aplicación de métodos innovadores que respondan a las demandas cambiantes del sector, alineando los objetivos económicos con una gestión sostenible de los recursos mineros.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En minería subterránea, la correcta planificación de los parámetros operativos constituye un aspecto crítico para la maximización del valor económico de los proyectos y su sostenibilidad a largo plazo. Entre estos parámetros destacan el cut off y el ritmo de producción, cuya determinación adecuada incide directamente sobre el Valor Actual Neto (VAN), uno de los principales indicadores de rentabilidad utilizados en la evaluación de proyectos mineros.

A pesar de su importancia, numerosos proyectos subterráneos en etapa de prefactibilidad y factibilidad continúan utilizando enfoques simplificados o metodologías tradicionales que no consideran la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos a lo largo del tiempo. Como consecuencia, se generan estimaciones de VAN que no siempre reflejan el verdadero potencial del proyecto, generando pérdidas de oportunidad en términos económicos y, en muchos casos, resultados poco atractivos que limitan el potencial de inversión.

En este contexto, la metodología Hill of Value (HoV) surge como una herramienta estratégica para apoyar la toma de decisiones en las etapas tempranas de planificación. Sin embargo, su aplicación tradicional presenta ciertas limitaciones al asumir condiciones estáticas o ideales que no se ajustan completamente a la realidad operativa de los proyectos mineros subterráneos.

La presente investigación se enmarca en este contexto y propone mejoras a la metodología HoV, incorporando factores operativos clave como la variabilidad en la capacidad de producción, la ley media y el perfil de inversiones en el tiempo, la limpieza de reservas y una recuperación minera inferior al 100%, junto con un modelo económico estocástico. Este enfoque se aplica al análisis de un proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad, el cual será explotado mediante el método de Tajeo con

Taladros Largos en su variante Bench & Fill (B&F), buscando optimizar el VAN a través de estimaciones más realistas y representativas del proyecto.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el contexto actual de la minería subterránea, uno de los principales desafíos consiste en maximizar la viabilidad económica de los proyectos en sus etapas tempranas, como los estudios de prefactibilidad. Aunque el enfoque del breakeven cut off ha sido ampliamente utilizado en la planificación minera y ha demostrado generar rentabilidad, presenta limitaciones significativas en términos de optimización del Valor Actual Neto (VAN).

Un ejemplo claro de estas limitaciones se observa en el proyecto de mina subterránea de oro que explota con el método de taladros largos, objeto de estudio en esta investigación. A pesar de obtener un VAN de 24.47M US\$, el Índice de Valor Actual Neto (IVAN) es de solo 0.14, lo que indica un nivel de rentabilidad bajo y limita el atractivo del proyecto para los inversionistas.

Este escenario evidencia la necesidad de fortalecer las metodologías existentes para la optimización del VAN. El enfoque tradicional del breakeven cut off no considera de manera integral las complejidades inherentes a las operaciones mineras subterráneas, ni logra optimizar el valor económico global del proyecto.

Por su parte, la metodología Hill of Value (HoV) ha mostrado ser una herramienta útil para analizar variables claves como el cut off y el ritmo de producción. No obstante, aún existen aspectos que no han sido suficientemente explorados, como variabilidad de la capacidad de producción, la fluctuación de la ley media, perfil de inversiones en el tiempo, la integración del riesgo y otros planteamientos estratégicos necesarios para identificar la mejor combinación de las variables (cut off y ritmo de producción) que permitan la maximización económica del proyecto.

Ante esta situación, surge la necesidad de resolver problemas técnicos críticos que actualmente limitan el valor económico alcanzable por los proyectos mineros subterráneos.

En función de ello, se plantean las siguientes interrogantes de investigación, que orientan el desarrollo de la presente tesis:

1.2.1 Problema general

¿En qué medida una inadecuada determinación simultánea del cut off y ritmo de producción afecta la optimización del Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué efecto tiene la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos en la determinación del cut off y su impacto sobre el VAN a lo largo del tiempo en un proyecto minero subterráneo de oro?
- ¿Cómo incide la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos en la selección del ritmo de producción y en su repercusión sobre el VAN a lo largo del tiempo en un proyecto minero subterráneo de oro?
- ¿De qué manera se comporta el VAN del proyecto minero subterráneo de oro al aplicar la metodología Hill of Value (HoV) tradicional?

Estas interrogantes evidencian que no solo es necesario identificar las variables clave que afectan el valor del proyecto, sino también comprender como interactúan entre si bajo diferentes metodologías de análisis. En particular, se requiere una herramienta capaz de integrar la dinámica operativa y económica del proyecto en el tiempo, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales. Por ello, la realidad problemática de este estudio radica en la necesidad urgente de optimizar el VAN mediante la determinación conjunta del cut off y ritmo de producción óptimos, así como en la aplicación de una versión mejorada de la metodología HoV que se ajuste a las condiciones reales del proyecto, incorporando la variabilidad dinámica de los parámetros a lo largo de su vida útil. Este enfoque permitirá abordar con mayor precisión los factores operativos y económicos, incrementar la rentabilidad y viabilidad del proyecto, y transformarlo en una oportunidad de inversión más atractiva para los tomadores de decisiones e inversionistas.

1.3 Justificación e importancia de la investigación

La justificación de esta investigación radica en la necesidad de maximizar el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de mina subterránea de oro en evaluación, con el objetivo de hacerlo más atractivo para los inversionistas y tomadores de decisión. Aunque el enfoque tradicional del breakeven cut off, empleado en el estudio de prefactibilidad del proyecto de mina subterránea de oro en evaluación y mostrados resultados positivos en términos de rentabilidad, este método presenta limitaciones significativas en la optimización completa del VAN.

En el caso del proyecto en estudio, el Valor Actual Neto (VAN) es de 24.47M US\$, combinado con un Índice de Valor Actual Neto (IVAN) de solo 0.14, revela un nivel de rentabilidad que no cumple con las expectativas de los inversionistas y los tomadores de decisiones, ya que evidencia una limitada viabilidad económica y un bajo atractivo desde la perspectiva de inversión para el proyecto.

A pesar de que los estudios previos del proyecto minero subterráneo de oro – en sus etapas conceptual y de prefactibilidad – han empleado el breakeven cut off como referencia para la planificación minera, dicho enfoque presenta limitaciones al no considerar las complejidades asociadas a las operaciones mineras subterráneas ni optimizar adecuadamente el valor económico del proyecto. En respuesta a esta problemática, la metodología Hill of Value (HoV) se presenta como una herramienta fundamental al permitir optimizar la interacción entre el cut off y el ritmo de producción, con el fin de maximizar el VAN.

No obstante, la presente investigación propone mejoras sustanciales a la metodología HoV, incorporando ajustes que permiten una evaluación más detallada y precisa de las variables involucradas, con el fin de superar las limitaciones del enfoque tradicional y ofrecer una perspectiva más robusta sobre la viabilidad económica del proyecto. Entre estas mejoras se incluyen la incorporación de una capacidad de producción variable en el tiempo, la ley media variable y un perfil de inversiones a lo largo del proyecto. Adicionalmente, se integrarán ajustes en el proceso de limpieza de reservas, o footprint

suavizado, recuperación minera menor al 100% y la incorporación de un modelo económico estocástico que permita evaluar los riesgos asociados al proyecto de manera más precisa.

Estas mejoras abordaran las complejidades operativas del proyecto minero de oro subterráneo en estudio, proporcionando una metodología más robusta para optimizar el valor económico a del proyecto minero subterráneo de oro a lo largo de su vida útil. De este modo, la presente tesis aborda la búsqueda de la optimización del VAN de un proyecto minero subterráneo de oro en fase de prefactibilidad, con el objetivo de mejorar su viabilidad económica mediante un enfoque mejorado de la metodología Hill of Value (HoV). Este enfoque analiza detalladamente la interacción entre el cut off y el ritmo de producción, variables cruciales para maximizar el Valor Actual Neto (VAN).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Optimizar el Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad, mediante la determinación simultánea de un cut off y ritmo de producción óptimos, incorporando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos a lo largo del tiempo, a través de la aplicación de una metodología Hill of Value (HoV) mejorada.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la determinación del cut off óptimo del proyecto de minero subterráneo de oro, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, mediante la aplicación de la metodología Hill of Value (HoV) mejorada.
- Analizar la selección del ritmo de producción óptimo del proyecto de minero subterráneo de oro bajo condiciones de variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, mediante la aplicación de la metodología Hill of Value (HoV) mejorada.
- Contrastar el VAN obtenido en el estudio de prefactibilidad con los resultados alcanzados mediante la aplicación de las metodologías Hill of Value (HoV)

tradicional y Hill of Value (HoV) mejorada, con el fin de identificar las diferencias en la estimación del cut off, ritmo de producción y VAN optimizado.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

La optimización del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad, mediante la determinación simultánea del cut off y un ritmo de producción óptimos, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, a través de una metodología HoV mejorada, permitirá obtener una evaluación más precisa y alineada al plan minero, superando las limitaciones operativas de los enfoques tradicionales.

1.5.2 Hipótesis específicas

- La determinación del cut off óptimo, integrando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos mediante la metodología HoV mejorada, incrementará significativamente el VAN en comparación con los métodos tradicionales de selección del cut off.
- La selección del ritmo de producción óptimo, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros a técnicos y económicos con la metodología HoV mejorada, permitirá una optimización más precisa del VAN respecto al obtenido con el ritmo de producción definido en el estudio de prefactibilidad.
- La comparación entre el VAN obtenido en el estudio de prefactibilidad y los resultados alcanzados mediante la aplicación de las metodologías HoV tradicional y HoV mejorada evidenciará que esta última permite una estimación más precisa del cut off, del ritmo de producción y del VAN optimizado del proyecto.

Luego de establecer las hipótesis que guían la presente investigación, es pertinente revisar los estudios previos que abordan problemáticas similares o enfoques metodológicos relacionados. Los antecedentes referenciales permiten contextualizar el trabajo dentro del estado del arte y sustentar la relevancia de las hipótesis planteadas,

identificando tanto los aportes existentes como las limitaciones que este estudio busca superar.

1.6 Antecedentes referenciales

La optimización del Valor Actual Neto (VAN) es uno de los principales objetivos en la planificación y desarrollo de proyectos mineros subterráneos, dado que determina en gran medida la viabilidad económica y el éxito a largo plazo de las operaciones. Entre los factores más influyentes en este proceso destacan el cut off y el ritmo de producción, estas variables independientes que, al ser adecuadamente gestionadas, pueden mejorar significativamente la rentabilidad del proyecto. La metodología Hill of Value (HoV) ha surgido como una herramienta clave en este análisis, permitiendo estudiar como la interacción de estas variables impacta directamente en el valor del proyecto.

La presente investigación se orienta a desarrollar, proponer y aplicar mejoras a la metodología HoV, buscando optimizar el desempeño de proyecto de mina subterránea de oro objeto de estudio. Para alcanzar este objetivo, se realizó una revisión exhaustiva de los avances más recientes y relevantes en el ámbito de la optimización del VAN, con aporte de diversos autores, quienes han contribuido significativamente a perfeccionar las técnicas de evaluación económica en minería.

1.6.1 Antecedentes internacionales

Taylor H. (1986), Rates of working of mines - a simple rule of thumb. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, 95, A203-A204. En su artículo, introdujo una fórmula empírica para estimar tanto el ritmo de producción como la vida útil de una mina, basada en datos observados. Este desarrollo sentó las bases para posteriores investigaciones que profundizaron en la interacción de las variables críticas para la optimización del VAN.

Hall B. (2003), How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value. En su documento presentó el concepto de la colina de valor, o Hill of Value, una representación que modela la relación entre el cut off y el ritmo de producción

con el objetivo de maximizar el Valor Actual Neto (VAN). Esta propuesta marco un punto de inflexión en la forma de visualizar y analizar dichas variables en la planificación minera.

Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan. En su libro se realizaron aportes adicionales que consolidaron y refinaron la metodología, incorporando nuevas herramientas de simulación y análisis económico, lo cual permitió su aplicación efectiva en estudios de prefactibilidad y planificación minera.

Rendu J. (2014), An Introduction to Cut Off Grade Estimation - Society for Mining, Metallurgy and Exploration. En su obra profundiza en los principios fundamentales del cut off, consolidando los avances metodológicos en su estimación y analizando con detalle sus implicancias operativas en la optimización del VAN. Asimismo, propone una estrategia de explotación que prioriza reservas con mejores leyes durante los primeros años de producción, lo que permite generar mayores ingresos en las fases iniciales del proyecto y en consecuencia, mejora la rentabilidad global. Este enfoque contribuye a maximizar el flujo de caja en los primeros años del proyecto, reduciendo riesgos financieros y aumentando la viabilidad económica a largo plazo.

Vera M. et al (2019), A new methodology base on Hill of Value for ore reserves selection in long-term planning for block caving. En su tesis aplicaron la metodología del HoV y los principios planteados por Rendu J. (2014) al método Block Caving. Su enfoque se centró en la selección de reservas optimizadas para maximizar el VAN, priorizando aquellas con leyes de corte más elevadas durante los primeros años de producción. Esta estrategia permitió incrementar el flujo de caja inicial y, por ende, mejorar la rentabilidad global del proyecto.

Hacking T. et al (2020), Applying the Hill of Value methodology to improve financial outcomes in block caving operations: A case study of the Carrapateena mine. Utilizando la metodología Hill of Value (HoV), analizaron el caso de la mina Carrapateena en el sur de Australia y evidenciaron que la aplicación de cut off's superiores al cut off marginal incrementa el VAN, optimizando así la rentabilidad global.

Bennett C. (2020), *Negatively Geared Ore Reserves: A Major Peril of the Breakeven Cut Off Grade*. Advirtió que, si bien las reservas estimadas con un breakeven cut off permiten maximizar el inventario de reservas del proyecto, a su vez, podrían resultar en una disminución del valor económico del proyecto, lo que resalta la importancia de un análisis integral que equilibre tanto el incremento de reservas como la maximización del VAN, destacando la necesidad de adaptar la estrategia de optimización del HoV según las condiciones específicas de cada proyecto.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Vila et al (2019), *Optimización de beneficios con gestión de riesgos en las minas subterráneas – Grupo Volcan*. Esta tesis se centra en la mina San Cristóbal del Grupo Volcan, ubicada en el Perú, donde se desarrolla un modelo integral para determinar el ritmo óptimo de producción con el objetivo de maximizar los beneficios económicos y el valor de la empresa. Entre sus principales aportes, destaca la identificación de un ritmo de producción óptimo que supera el ritmo actual, logrando aumentar el VAN y mejorar la rentabilidad general del proyecto, al mismo tiempo que se gestiona la incertidumbre inherente a la operación minera.

Santana M. (2020), *Maximización de valor presente neto a través de la optimización de la ley de corte en una mina subterránea*. Aplico la fórmula de Lane para determinar la ley de corte óptima de un yacimiento hipotético, con el objetivo de maximizar el VAN. Su estudio comparó el modelo tradicional basado en el breakeven cut off y el enfoque propuesto basado en Lane, evidenciando mejoras significativas en la rentabilidad al emplear una estrategia más dinámica y adaptativa.

Salinas et al (2022), *Evaluación de Cut Off económicos variables para depósitos de oro en Cajamarca*. Evaluaron cut off's económicos variables ajustadas a las fluctuaciones en los costos operativos específicos de depósitos de oro en la región de Cajamarca, Perú. Su trabajo destacó la importancia de adaptar dinámicamente las leyes de corte a las variaciones del entorno económico para mejorar la precisión en la estimación de reservas y planificación minera.

Aragón R. (2024), Análisis del impacto del cut off marginal y el cut off incremental al implementarlos desde el planeamiento conceptual de una mina subterránea. Esta tesis analiza como la implementación de diferentes estrategias de cut off, como el marginal y el incremental, desde las etapas iniciales de planificación genera mejoras significativas en el flujo de caja y el VAN, al permitir una explotación más eficiente de los tajos marginales y una optimización más precisa del plan de minado.

En conjunto, si bien estos trabajos han contribuido a la comprensión de variables clave en la planificación minera, aun no se ha desarrollado en el contexto peruano una metodología que articule de manera simultánea el cut off, perfil de producción y el manejo de inversiones considerando la variabilidad a lo largo del tiempo. Además, tanto en la literatura nacional como internacional, persisten vacíos conceptuales y metodológicos en aspectos clave como la incorporación de capacidades de producción variable, la representación detallada del perfil de inversiones durante la vida del proyecto, y la integración sistemática del análisis de riesgos en los modelos de optimización minera.

La ausencia de estos factores limita la robustez y adaptabilidad de las estrategias de planificación frente a escenarios de alta volatilidad de precios, variabilidad en los costos de inversión y operativos, como también condiciones operativas cambiantes, características recurrentes en la minería peruana.

Frente a este panorama, la presente tesis abordará estas áreas no exploradas, con el objetivo de no solo subsanar los vacíos identificados tanto en la literatura internacional como nacional, sino también generar una metodología de optimización económica adaptada a las particularidades del proyecto de mina subterránea de oro en estudio. De esta manera, se busca garantizar una evaluación más robusta y realista de la rentabilidad del proyecto minero, considerando también el riesgo inherente a su desarrollo.

1.7 Alcance del proyecto

El presente estudio tiene como objetivo la optimización del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de explotación de una mina subterránea de oro, que emplea el método de taladros largos. Para ello, se implementará una metodología mejorada del enfoque Hill of

Value, incorporando una serie de ajustes avanzados que permiten una evaluación más precisa y rigurosa de las variables claves del proyecto. Los principales alcances de esta investigación son los siguientes:

1.7.1 Desarrollo y aplicación de la metodología mejorada

La investigación se enfoca en la mejora de la metodología Hill of Value (HoV), incorporando ajustes que permiten una evaluación más precisa de las variables involucradas. Estos ajustes incluyen la capacidad de producción variable en el tiempo, la ley media variable, un perfil de inversiones a lo largo del proyecto, limpieza de reservas, recuperación minera menor al 100%.

1.7.2 Determinación del cut off óptimo

Se analizará y determinará el cut off óptimo para el proyecto, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros a lo largo del tiempo. Esto permitirá establecer una base sólida para la evaluación económica del proyecto.

1.7.3 Selección del ritmo de producción óptimo

Se identificará el ritmo de producción óptimo, integrando la variabilidad dinámica de los parámetros y asegurando que este ritmo se ajuste a las complejidades operativas del proyecto minero subterráneo.

1.7.4 Modelo estocástico para evaluación de riesgo

Se desarrollará un modelo estocástico con el fin de integrar los riesgos de los distintos casos óptimos analizados (HoV tradicional y HoV mejorado). Este modelo permitirá cuantificar y mitigar los riesgos asociados al proyecto, brindando una evaluación integral de su viabilidad económica.

1.7.5 Comparación de resultados

Se contrastarán los resultados del Valor Actual Neto (VAN) obtenidos en el estudio de prefactibilidad con los resultados obtenidos mediante la metodología HoV tradicional y la versión mejorada. Esta comparación incluirá la elaboración de los planes mineros ajustados a los cut off y ritmos de producción seleccionados para cada caso, permitiendo

demostrar la eficacia de la metodología mejorada en la optimización del VAN y en la viabilidad económica del proyecto.

1.7.6 Propuesta de estrategias para optimización del VAN del proyecto

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación se proponen las estrategias dirigidas a incrementar la atractividad del proyecto ante inversionistas y tomadores de decisiones. Estas estrategias se basarán en la optimización del Valor Actual Neto (VAN) y otros indicadores clave, con el fin de fortalecer la propuesta económica del proyecto minero.

En resumen, la investigación busca proporcionar un análisis integral que permita la optimización del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de explotación de la mina subterránea de oro mediante la implementación de una metodología mejorada del Hill of Value. Al abordar aspectos críticos como el cut off y el ritmo de producción óptimos y la evaluación de riesgos a través de un enfoque estocástico, se espera no solo mejorar la precisión de la evaluación económica, sino también ofrecer estrategias concretas que incrementen el atractivo del proyecto para los inversionistas.

No obstante, el estudio no contempla la evaluación de otros métodos de explotación ni factores externos que puedan influir en el entorno operativo del proyecto. Este enfoque delimitado permite obtener resultados específicos y aplicables, contribuyendo a la mejora de los procesos de toma de decisiones en minería subterránea, y proporcionando una base técnica sólida para el desarrollo sostenible del sector y el éxito económico del proyecto.

1.8 Variables e indicadores de la investigación

1.8.1 Variable dependiente

La variable dependiente es Valor Actual Neto (VAN), expresado en millones de dólares estadounidenses (MUS\$). Este indicador refleja la rentabilidad económica esperada del proyecto bajo distintas condiciones de diseño y parámetros operativos.

1.8.2 Variables independientes

Las variables independientes representan los principales factores de decisión sobre los cuales se evaluará su impacto en la rentabilidad del proyecto. Su adecuada

determinación es esencial para la optimización del VAN dentro del marco dinámico de planificación minera.

Las variables independientes consideradas en esta investigación son las siguientes:

- Cut off óptimo, valor de cut off (expresado en US\$/t) que maximiza el VAN del proyecto, considerando la variabilidad técnica y económica a lo largo del tiempo (variable independiente 1).
- Ritmo de producción óptimo, ritmo de producción diario óptimo (expresado en tpd) que, dentro de las restricciones operativas del proyecto, contribuye a alcanzar el VAN máximo (variable independiente 2).

1.8.3 Indicadores

Las indicadores seleccionados permiten cuantificar de manera objetiva las variables planteadas en la investigación.

Estos servirán para evaluar el impacto de las decisiones estratégicas sobre la rentabilidad del proyecto minero.

A continuación, se detallan los principales indicadores a utilizar:

- VAN (MUS\$), para la variable dependiente.
- IVAN (adimensional), para la variable dependiente.
- TIR (%), para la variable dependiente.
- Perfil de riesgo (%), para la variable dependiente.
- Valor del cut off óptimo (US\$/t), para la variable independiente 1.
- Ley media Au asociada al cut off óptimo (g/t), para la variable independiente 1.
- Reservas minerales bajo el cut off óptimo (Mt), para la variable independiente 1.
- Ritmo de producción óptimo (tpd), para la variable independiente 2.
- LOM o años de vida de Mina bajo ritmo de producción óptimo (años), para la variable independiente 2.

1.9 Diseño metodológico

1.9.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que, enmarcada en un contexto ingenieril, busca resolver un problema práctico vinculado a la optimización económica de un proyecto minero subterráneo de oro, mediante el uso de herramientas analíticas y modelos cuantitativos.

1.9.2 Métodos de investigación

Se emplean métodos de enfoque cuantitativo, como el análisis documental, el modelamiento económico minero, la simulación computacional, la optimización matemática y el análisis comparativo entre metodologías.

1.9.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación es de tipo cuantitativo, con un enfoque explicativo – predictivo y relacional, basado en hipótesis racionales. Se desarrollan modelos matemáticos y simulaciones que integran variables económicas y operativas dinámicas en un entorno real, utilizando datos del estudio de prefactibilidad del proyecto minero subterráneo.

1.9.4 Técnicas e instrumentación en recolección de datos

La recolección de datos se realizará mediante técnicas de análisis documental y modelamiento computacional. La información base proviene del estudio de prefactibilidad del proyecto minero subterráneo de oro, el cual proporciona los parámetros técnicos, económicos y operativos requeridos para el análisis. Se aplicará la metodología Hill of Value en sus versiones tradicional y mejorada para evaluar múltiples escenarios que integren la variabilidad dinámica de los parámetros a lo largo del tiempo. Los resultados económicos obtenidos de los valores óptimos de cut off y ritmo de producción serán comparados con los resultados del estudio de prefactibilidad, con el objetivo de contrastar su impacto en la valorización económica del proyecto. Asimismo, se evaluará cuál de las dos metodologías -la tradicional o la mejorada - se ajusta de manera más adecuada a los requerimientos de una evaluación minera integral en etapa de prefactibilidad.

La investigación contempla la generación de 783 escenarios combinados, producto de la evaluación cruzada de 29 valores de cut off — que van desde 60 US\$/t hasta 200 US\$/t, en incrementos de 5 US\$/t — y 27 ritmos de producción, que varían desde 1,000 tpd hasta 3,600 tpd, en incrementos de 100 tpd. Para cada combinación, se realiza la valorización de reservas mineras, planes de producción en base al método de explotación de Tajeo por Taladros Largos en su variante Bench & Fill, se ajustan los costos operativos (OPEX) y de capital (CAPEX), y se estima el Valor Actual Neto (VAN).

El procesamiento de la información se ejecuta mediante hojas de cálculo estructuradas y software de simulación minera, lo que permite identificar la combinación óptima de cut off y ritmo de producción que maximiza el VAN bajo condiciones operativas realistas.

1.9.5 Población

La población objeto de estudio está constituida por los 783 escenarios generados a partir de la combinación cruzada de 29 valores de cut off (desde 60 US\$/t hasta 200 US\$/t, en incrementos de 5 US\$/t) y 27 ritmos de producción (desde 1,000 tpd hasta 3,600 tpd, en incrementos de 100 tpd). Cada escenario incorpora la valorización técnica y económica de las reservas minerales y del plan de producción bajo el método de explotación de Tajeo por Taladros Largos en su variante Bench and Fill, considerando la aplicación de parámetros dinámicos en el tiempo. Se aplican tanto la metodología Hill of Value tradicional como su versión mejorada, con el fin de identificar los valores óptimos de cut off y ritmo de producción, y evaluar cuál de las metodologías se ajusta mejor a una valorización económica integral en comparación con el caso base definido en el estudio de prefactibilidad.

1.10 Matriz de consistencia: Articulación técnico-económica

Para garantizar la rigurosidad metodológica y la coherencia entre los componentes fundamentales del estudio, se estructuró la matriz de consistencia, la cual se detalla en la Tabla 1 y la Tabla 2. Esta herramienta integra los objetivos técnico-económicos del proyecto con las variables operativas, los métodos de optimización empleados (HoV

tradicional y mejorada) y los resultados esperados, siguiendo las buenas prácticas de planificación minera. La matriz valida cada decisión operativa – como la selección del cut off o el ritmo de producción – impacta directamente en los indicadores financieros (VAN, TIR), asegurando que el diseño metodológico este alineado con las complejidades dinámicas del proyecto minero subterráneo.

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y DIMENSIONES	INDICADORES	DISEÑO METODOLÓGICO
<p>Problema general</p> <p>¿En qué medida una inadecuada determinación simultánea del cut off y ritmo de producción afecta la optimización del Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Optimizar el Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad, mediante la determinación simultánea de un cut off y ritmo de producción óptimos, incorporando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos a lo largo del tiempo, a través de la aplicación de una metodología Hill of Value (HoV) mejorada</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La optimización del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto minero subterráneo de oro en etapa de prefactibilidad, mediante la determinación simultánea del cut off y un ritmo de producción óptimos, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, a través de una metodología HoV mejorada, permitirá obtener una evaluación más precisa y alineada al plan minero, superando las limitaciones operativas de los enfoques tradicionales.</p>	<p>Variable dependiente:</p> <p>Valor Actual Neto (VAN).</p>	<p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor Actual Neto (115.68 MUS\$) ▪ IVAN (0.56) ▪ TIR (25.01 %) ▪ Perfil de riesgo (< 5%) ▪ Cut Off óptimo (140 US\$/t) ▪ Ley media Au (3.47 g/t), asociada al cut off óptimo. ▪ Reservas minerales bajo el cut off óptimo (3.66 Mt). ▪ Ritmo de producción óptimo (2,100 tpd). ▪ LOM (5.5 años). 	<p>Tipo de investigación</p> <p>Aplicativa.</p> <p>Métodos de Investigación</p> <p>Cuantitativo con análisis documental, modelamiento económico minero, simulación computacional y optimización matemática.</p> <p>Diseño de Investigación</p> <p>Cuantitativo con un enfoque explicativo-predictivo y relacional, basado en hipótesis racionales.</p> <p>Población</p> <p>Escenarios técnicos-económicos generados: 29 valores de cut off (60 a 200 US\$/t) y 27 ritmos de producción (1,000 a 3,600 tpd), combinados en 783 escenarios para el proyecto minero subterráneo.</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>¿Qué efecto tiene la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos en la determinación del cut off y su impacto sobre el VAN a lo largo del tiempo en un proyecto minero subterráneo de oro?</p> <p>¿Cómo incide la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos en la selección del ritmo de producción y en su repercusión sobre el VAN a lo largo del tiempo en un proyecto minero subterráneo de oro?</p> <p>¿Cómo se comporta el VAN del proyecto minero subterráneo de oro al aplicar la metodología Hill of Value (HoV) tradicional</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>Evaluar la determinación el cut off óptimo del proyecto de minero subterráneo de oro, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, mediante la aplicación de la metodología Hill of Value (HoV) mejorada.</p> <p>Analizar la selección del ritmo de producción óptimo del proyecto de minero subterráneo de oro bajo condiciones de variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos, mediante la aplicación de la metodología Hill of Value (HoV) mejorada.</p> <p>Contrastar el VAN obtenido en el estudio de prefactibilidad con los resultados alcanzados mediante la aplicación de las metodologías Hill of Value (HoV) tradicional y Hill of Value (HoV) mejorada, con el fin de identificar las diferencias en la estimación del cut off, ritmo de producción y VAN optimizado.</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>La determinación del cut off óptimo, integrando la variabilidad dinámica de los parámetros técnicos y económicos mediante la metodología HoV mejorada, incrementará significativamente el VAN en comparación con los métodos tradicionales de selección del cut off.</p> <p>La selección del ritmo de producción óptimo, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros a técnicos y económicos con la metodología HoV mejorada, permitirá una optimización más precisa del VAN respecto al obtenido con el ritmo de producción definido en el estudio de prefactibilidad.</p> <p>La comparación entre el VAN obtenido en el estudio de prefactibilidad y los resultados alcanzados mediante la aplicación de las metodologías HoV tradicional y HoV mejorada evidenciará que esta última permite una estimación más precisa del cut off, del ritmo de producción y del VAN optimizado del proyecto.</p>	<p>Variable Independiente:</p> <p>Cut off óptimo.</p> <p>Ritmo de producción óptimo.</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

La selección del cut off y del ritmo de producción constituye un elemento central para la optimización del Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto minero. Por ello, esta tesis toma como punto de partida el desarrollo de la metodología de Hill of Value (HoV) en su forma tradicional, adaptándola al contexto específico de un proyecto minero subterráneo. En este marco, se desarrollan los fundamentos teóricos necesarios para comprender y aplicar dicha metodología, destacando el rol estratégico de las variables clave involucradas en la creación de valor, como el cut off y el ritmo de producción.

Mediante una revisión crítica de enfoques tradicionales y modernos de planificación minera, se establece el marco teórico que respalda la implementación de la metodología de optimización orientada a maximizar el valor económico del proyecto, más allá de la simple expansión de reservas o del cumplimiento de metas físicas de producción. En este contexto, se presenta a continuación la metodología Hill of Value, la cual constituye la base para el análisis estratégico desarrollado en esta investigación.

2.1.1 Metodología Hill of Value

Hall B. (2003), *How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value*, presentó la herramienta heurística denominada Hill of Value (HoV), orientada a optimizar la toma de decisiones estratégicas en la gestión de proyectos mineros. Su propuesta plantea una crítica directa a los enfoques tradicionales de planificación, al cuestionar la suposición de que maximizar la reserva del yacimiento conduce necesariamente al mayor Valor Actual Neto (VAN). Por el contrario, demuestra que una estrategia basada en leyes de corte más elevadas puede generar operaciones mineras de menor escala, pero con mayor valor económico. Este enfoque desafía la lógica intuitiva de que "más es mejor y menos es peor", ya que reconoce que ciertos bloques, a pesar de su volumen, pueden destruir valor si sus costos marginales superan su

contribución económica. En consecuencia, priorizar bloques de mayor ley o mayor valor, aunque implique explotar un menor tonelaje, puede resultar en un VAN superior.

Posteriormente, Hall B. (2012), *Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan*, amplía los fundamentos y alcances de la metodología HoV, resaltando su utilidad para identificar estrategias que influyen significativamente en la creación o destrucción del valor en operaciones mineras a lo largo del tiempo. A diferencia de los modelos tradicionales que establecen metas fijas de producción sin evaluar su impacto económico, el enfoque HoV permite analizar de manera conjunta el efecto del cut off y el ritmo de producción sobre el VAN, revelando que tratar mayores volúmenes de mineral no garantiza necesariamente una mayor rentabilidad. Este principio se representa mediante una superficie tridimensional donde el VAN es función del cut off y del ritmo de producción, lo que permite identificar las combinaciones estratégicas que maximizan el valor económico del proyecto.

Hall B. (2012), también advierte que, durante los estudios de factibilidad, los proyectos que parecen económicamente viables y robustos, rara vez son sometidos a análisis que exploren configuraciones alternativas que optimicen estratégicamente el valor. No obstante, si se generaran optimizaciones posteriores a la factibilidad, estas “optimizaciones” suelen limitarse a menudo a mejorar la eficiencia de la estrategia del plan existente, sin explorar otras configuraciones estratégicas que podrían maximizar el valor del proyecto. En el contexto, las variables clave como el ritmo de producción y el cut off, los cuales están fuertemente influenciados por la heterogeneidad en la geometría, leyes y la distribución del yacimiento, así como por la selección de los posibles métodos de explotación – son determinantes tanto para la factibilidad operativa como para el potencial económico del proyecto. Por ello, la metodología HoV se posiciona como una herramienta eficaz para alinear decisiones técnicas con los objetivos de generación de valor.

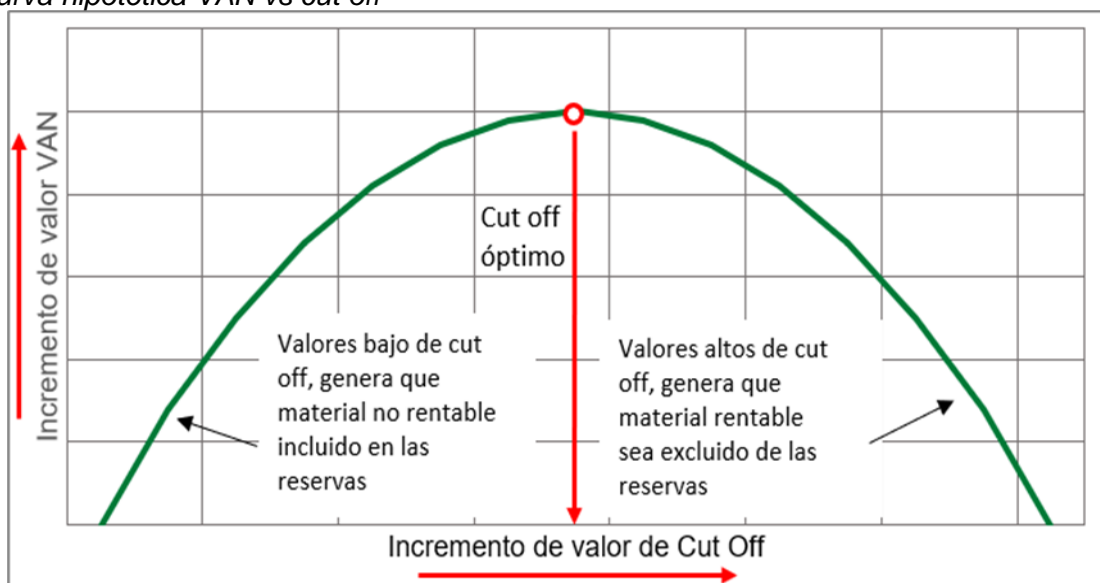
A partir de este enfoque, el primer paso consiste en analizar de forma bidimensional la relación entre el cut off y el VAN, con el fin de identificar el rango de cut off's que maximizan el valor del proyecto.

2.1.1.1 Análisis bidimensional: VAN vs cut off. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, analiza la variación del Valor Actual Neto (VAN) en función del cut off, destacando que, al incrementar progresivamente el cut off desde un valor inicial bajo, el VAN del proyecto inicialmente aumenta hasta alcanzar un máximo, a partir del cual comienza a decrecer. Este comportamiento se explica por el efecto combinado de dos factores: a valores bajos de cut off, se incluyen en la reserva materiales de bajo valor o incluso material que destruye el valor económico; mientras que a valores elevados de cut off, se excluyen materiales que aún podrían contribuir positivamente al VAN. Por lo tanto, existe un valor óptimo de cut off que equilibra ambos efectos y maximiza el VAN del proyecto.

Este análisis puede visualizarse a través de una curva del VAN en función del cut off, como se muestra en la Figura 1, la cual permite identificar el punto de máximo valor. Cabe resaltar que dicho óptimo depende de múltiples factores técnicos y económicos, tales como los costos operativos, el precio de los metales y la distribución del valor dentro del yacimiento.

Figura 1

Curva hipotética VAN vs cut off



Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

La Figura 1 ilustra una curva bidimensional (2D) que relaciona el Valor Actual Neto con el valor de cut off, en un contexto donde los parámetros clave como el método de

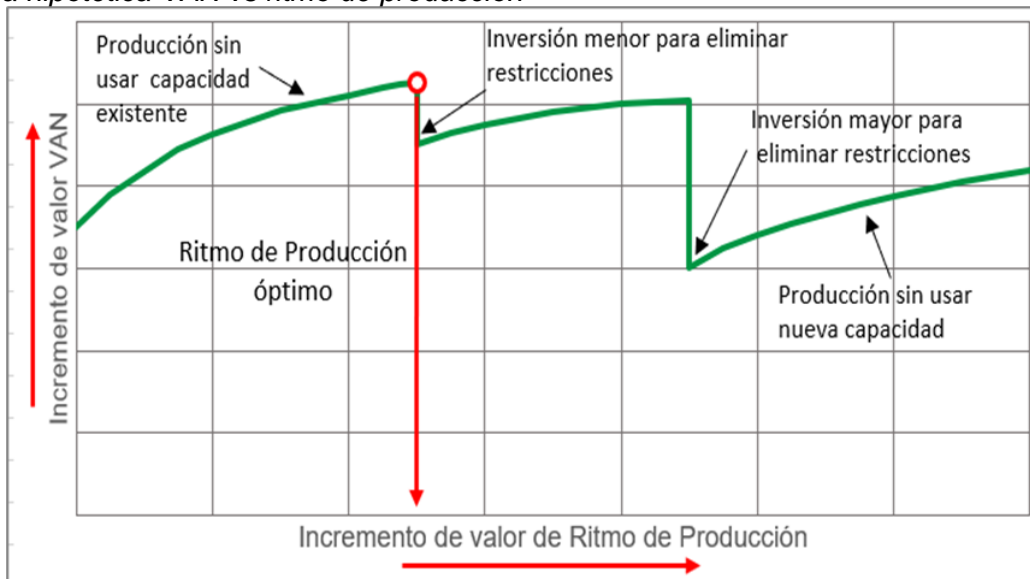
minado, plan de inversiones y ritmo de producción se mantienen constantes. En este gráfico, el cut off se representa como la única variable independiente en el eje horizontal, mientras que el eje vertical representa el VAN, utilizado como métrica cuantitativa para evaluar diferentes alternativas de planificación minera. Este enfoque permite identificar el valor óptimo del cut off que maximiza el VAN del proyecto, priorizando aquellas configuraciones que generen mayor valor económico y se alineen con los objetivos financieros de la compañía.

Dado que el ritmo de producción también constituye una variable operativa clave con impacto directo en el valor del proyecto, se desarrolla a continuación un análisis específico de su relación con el VAN.

2.1.1.2 Análisis bidimensional: VAN vs ritmo de producción. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, presenta una curva bidimensional (2D) del Valor Actual Neto (VAN) en función del ritmo de producción, manteniendo constante variables como el método de minado, plan de inversiones y cut off, mientras que el ritmo de producción actúa como la única variable independiente. Esta representación gráfica mostrada en la Figura 2, permite ilustrar como el VAN responde ante variaciones en este parámetro operativo.

Figura 2

Curva hipotética VAN vs ritmo de producción



Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

La relación entre el ritmo de producción y el VAN es inherentemente no lineal. Inicialmente, existe una correlación positiva: un aumento en el ritmo de producción puede acelerar la generación de ingresos y mejorar el aprovechamiento de la infraestructura instalada. No obstante, esta relación se estabiliza o incluso se invierte al superar ciertos umbrales operativos, debido al incremento en los costos unitarios, mayores requerimientos de inversión y restricciones por recursos físicos disponibles. Como resultado, existe un punto óptimo de ritmo de producción que maximiza el VAN del proyecto.

Hall B. (2012) indica que, más allá de este umbral óptimo, incrementos adicionales en el ritmo de producción no solo dejan de aportar valor, sino que pueden comprometer la rentabilidad del proyecto. Este comportamiento se observa en la Figura 2, donde la curva del VAN alcanza un máximo y, posteriormente, presenta una meseta o incluso una caída abrupta.

Este fenómeno se explica por las limitaciones impuestas por los recursos físicos disponibles del sistema. Mientras estas condiciones permanezcan constantes, el VAN puede seguir incrementándose junto con el ritmo de producción hasta alcanzar un punto límite, a partir del cual dichos recursos ya no permitirán sostener mayores ritmos de producción, provocando una pérdida acelerada del valor económico. Este punto marca el límite técnico-económico del ritmo óptimo de producción.

En este contexto, Hall B. (2012), también destaca que es posible superar estos cuellos de botella mediante inversiones de capital dirigidas a ampliar la capacidad del sistema. Aunque estas inversiones pueden generar una reducción inicial del VAN – al elevar los costos sobre un nivel de ritmo de producción ya estabilizado – podrían justificarse si permiten alcanzar un nuevo régimen de producción rentable.

La Figura 2 muestra este comportamiento donde se representa tres niveles de ritmo de producción dentro de un rango objetivo, así como el efecto del impacto de dos inyecciones de capital que permiten alcanzar ritmos de producción más altos.

Asumiendo que el rango de ritmo de producción representado en el eje horizontal es técnicamente factible para el yacimiento, plantea que es posible alcanzar un ritmo de producción óptimo mediante una adecuada gestión de los recursos físicos disponibles.

Hall B. (2012) finalmente, advierte que la eliminación de restricciones mediante inversiones de capital puede resultar contraproducente si los ingresos generados no compensan los nuevos costos incurridos. En estos casos, el intento por expandir la capacidad productiva puede conducir a una pérdida de rentabilidad, comprometiendo la viabilidad económica del proyecto.

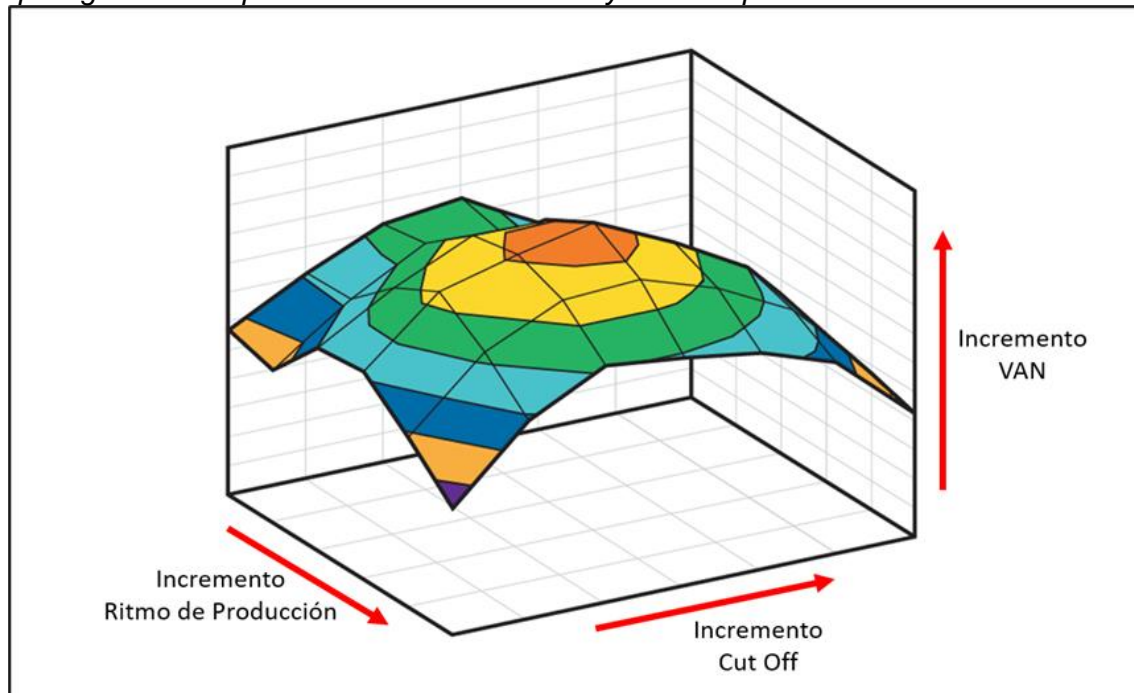
Considerando que tanto el cut off como el ritmo de producción influyen significativamente en la generación de valor, resulta necesario incorporar ambos parámetros en un análisis conjunto. Esta necesidad da lugar a un enfoque tridimensional, que se presenta a continuación.

2.1.1.3 Análisis tridimensional: superficie HoV. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, introduce una evaluación conjunta del cut off y del ritmo de producción mediante una superficie tridimensional conocida como Hill of Value (HoV), la cual permite identificar combinaciones óptimas de ambas variables para maximizar el Valor Actual Neto. A diferencia del enfoque secuencial, esta herramienta enfatiza que la interacción entre el cut off y el ritmo de producción no es aditiva, por lo que una optimización simultánea resulta necesaria para capturar adecuadamente el valor económico del proyecto.

La Figura 3 muestra un modelo representativo de esta superficie, en la que se identifica un punto o región correspondiente al VAN máximo, reflejando las condiciones óptimas de operación bajo los parámetros analizados.

Figura 3

Típica grafica HoV para valores VAN vs cut off y ritmo de producción



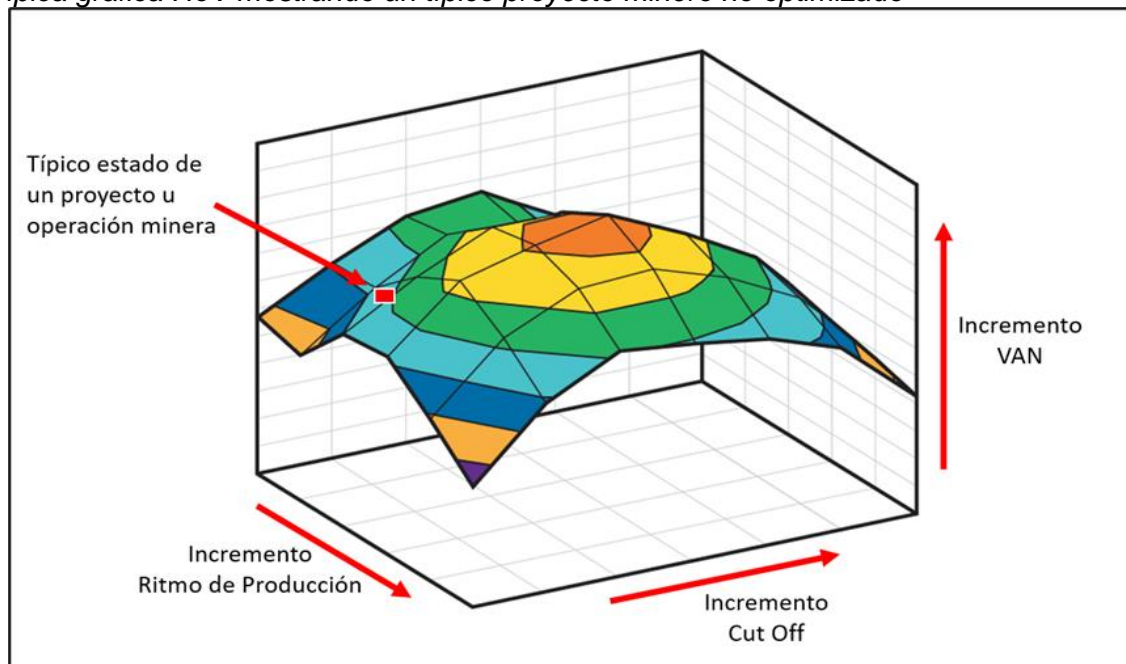
Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

Se ha podido observar cómo cada uno de los parámetros estratégicos de decisión (cut off y ritmo de producción) pueden ser optimizados independientemente, pero fijando o limitando la otra variable. Es decir, aunque ambas variables son independientes entre sí, un valor de cut off seleccionado podría imponer límites prácticos a un ritmo de producción que no sea el óptimo y viceversa. Por tanto, para maximizar el VAN, es fundamental llevar a cabo una optimización conjunta de ambas variables.

La Figura 4 ilustra una superficie tridimensional típica de un proyecto u operación minera evaluado bajo enfoques tradicionales, donde puede observarse que la posición del proyecto no necesariamente se ubica en la zona de valor máximo.

Figura 4

Típica grafica HoV mostrando un típico proyecto minero no optimizado



Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

Hall B. (2012), señala que en la práctica la posición operativa de un proyecto – ya sea en etapa de prefactibilidad, factibilidad o incluso de una mina en plena operación – rara vez coincide con el punto de máximo VAN sobre dicha superficie HoV, lo que pone en evidencia que no se ha alcanzado el nivel óptimo de valorización. En consecuencia, las estrategias convencionales de planificación minera tienden a desviarse del máximo valor económico que podría obtenerse mediante un enfoque de optimización conjunta.

Ante esta situación, cobra relevancia el análisis de estrategias comúnmente empleadas en la industria para mejorar la rentabilidad de los proyectos sin necesariamente lograrlo, así como los riesgos asociados a dichas implementaciones.

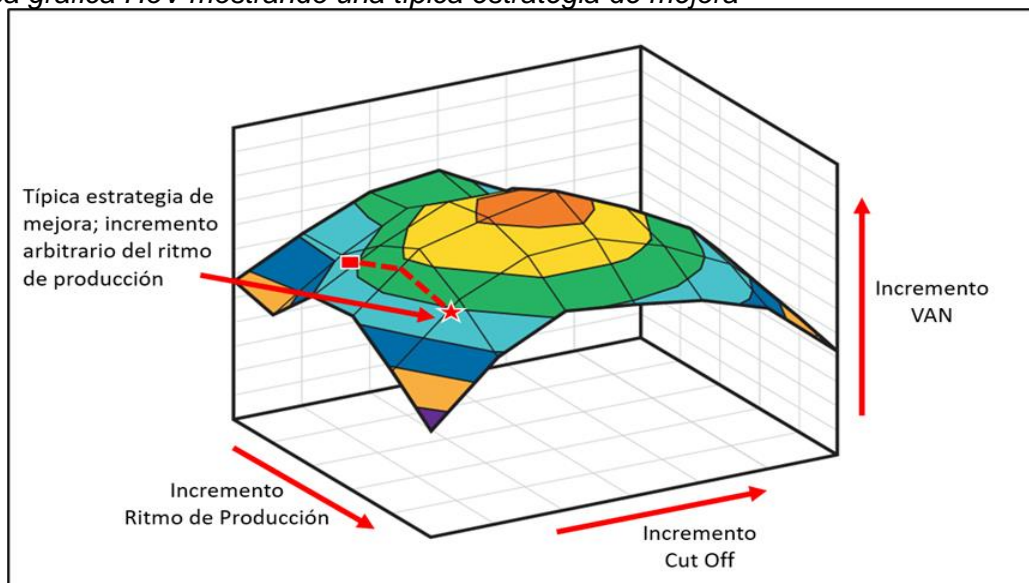
2.1.1.4 Estrategias comunes de mejora y sus riesgos en planificación minera. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, señala que, en la práctica minera, una estrategia común para mejorar la rentabilidad de una mina en operación consiste en aumentar el ritmo de producción y reducir los costos, con el objetivo de distribuir los costos fijos sobre un mayor volumen de producción, lo que reduce los costos unitarios y aumenta el margen promedio, como se ilustra en la Figura 5. Esta lógica

sugiere que incrementar el ritmo de producción puede mejorar el margen promedio. Sin embargo, esta aproximación puede generar varios desafíos; ya que, para lograr un incremento en la producción, es usualmente necesario reducir el cut off para acceder a un mayor volumen de mineral. Ajustar el cut off al nuevo punto de equilibrio de costos podría parecer una buena decisión adecuada al reducir los costos unitarios, pero dicha estrategia puede resultar contraproducente si conlleva una disminución del VAN, como se observa en la Figura 5. Además, Hall B. (2012) advierte que es posible que el sistema de producción ya opere cerca de sus límites de capacidad, por lo que un incremento adicional en el ritmo de producción requeriría inversiones de capital para superar restricciones técnicas. Estas inversiones, lejos de mejorar los resultados económicos, pueden generar una caída en el VAN si no se compensan adecuadamente con ingresos adicionales. La Figura 5 ejemplifica justamente una estrategia mal aplicada, en la cual, a pesar del incremento en el ritmo de producción, el VAN disminuye debido a una reducción excesiva del cut off y a la sobredemanda sobre los recursos operativos del proyecto.

Este tipo de desviaciones subraya la importancia de adoptar un enfoque sistemático que permita identificar configuraciones verdaderamente óptimas, en lugar de depender de ajustes parciales o empíricos.

Figura 5

Típica grafica HoV mostrando una típica estrategia de mejora



Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

2.1.1.5 Estrategia óptima según la metodología HoV. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, sostiene que el principal desafío en la planificación minera estratégica radica en identificar la combinación óptima de variables de decisión que maximice el valor económico del proyecto.

Las interacciones no lineales entre el cut off y el ritmo de producción hacen que una optimización secuencial o basada únicamente en la intuición resulte insuficiente para alcanzar el máximo valor. En este contexto, la metodología Hill of Value (HoV) permite representar de manera tridimensional la relación entre estas dos variables y su efecto conjunto sobre el VAN, proporcionando así una solución efectiva para superar dicha complejidad. Esta metodología facilita la identificación de una solución conjunta - es decir, una combinación simultánea de cut off y ritmo de producción - que maximiza el VAN del proyecto.

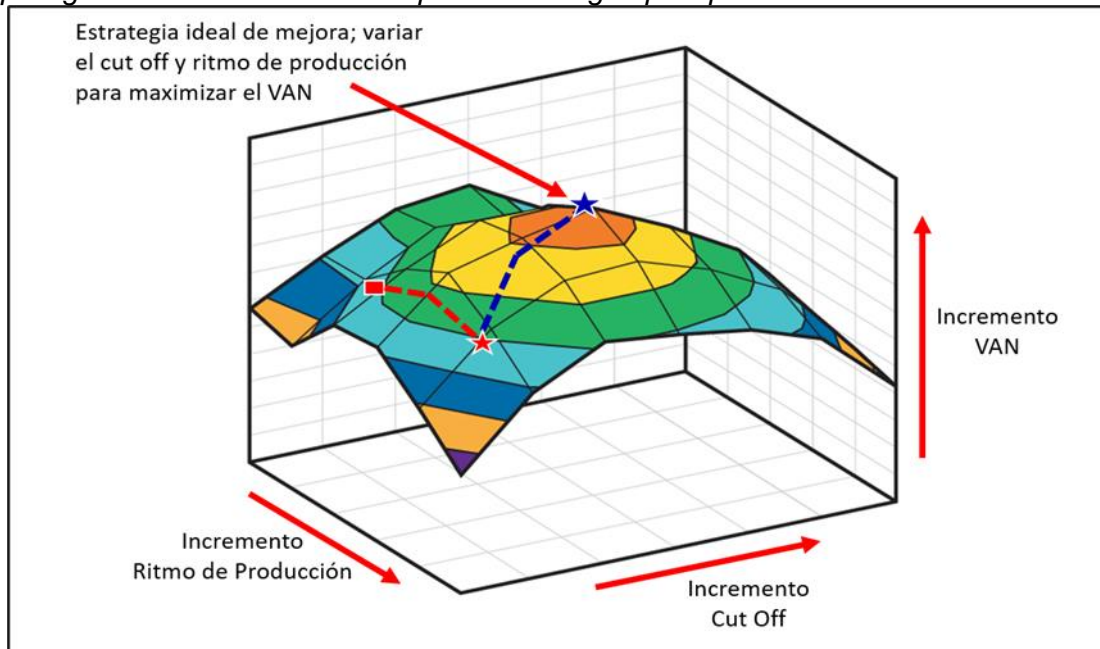
Como se aprecia en la Figura 6, esta solución óptima generalmente implica un incremento tanto en el cut off como en el ritmo de producción. Este ajuste estratégico conduce a un mayor volumen de producción y a una mejora en la calidad del mineral extraído, generando un mayor valor económico global para el proyecto.

Además, el hecho de alcanzar una maximización del valor implica que los recursos físicos del proyecto pueden sostener los incrementos de cut off y ritmo de producción, lo que respalda la decisión de realizar inversiones de capital adicionales.

Si bien estas inversiones representan un mayor compromiso financiero, se justifican por la rentabilidad superior que se alcanza al posicionarse en el punto óptimo de la superficie HoV.

Figura 6

Típica grafica HoV mostrando la óptima estrategia que optimiza el VAN



Fuente: Cut Off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, Hall B. (2012)

Con lo anterior, se cierra la revisión del enfoque Hill of Value (HoV), el cual permite visualizar y optimizar el valor económico de un proyecto a través del análisis conjunto del cut off y el ritmo de producción. Este enfoque resulta fundamental para comprender los desafíos y oportunidades en la planificación minera estratégica. Sin embargo, para aplicar correctamente esta metodología y mejoras en su implementación, es indispensable contar con una comprensión clara de los conceptos técnicos clave que sustentan el modelo económico-minero.

2.1.2 Recursos y reservas minerales

Joint Ore Reserves Committee (2012), Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code), establece que las prácticas aceptadas por la industria minera requieren que los Recursos Minerales sean estimados considerando una ley de corte sobre la cual se genere un sólido con “perspectivas razonables de una eventual extracción económica”. Resulta crítico que el geólogo considere los controles geológicos y estructurales que puedan afectar la configuración de este sólido, especialmente si incluye más de un dominio litológico.

Joint Ore Reserves Committee (2012) indica que un Recurso Mineral es una concentración u ocurrencia de material sólido de interés económico dentro o sobre la corteza de la Tierra en tal forma, ley y cantidad que hay perspectivas razonables de una eventual extracción económica. Esta definición se fundamenta en la ubicación, cantidad, ley y calidad, continuidad y otras características geológicas del Recurso Mineral, conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimiento geológico específico, incluyendo muestreo. Además, los Recursos Minerales se clasifican en tres categorías, en orden creciente de confianza geológica: Inferidos, Indicados y Medidos. Las porciones de un depósito que no tienen perspectivas razonables de eventual extracción económica no deben ser incluidas en un Recurso Mineral.

Joint Ore Reserves Committee (2012) establece que el término “Recurso Mineral” comprende la mineralización que ha sido identificada dentro de los límites razonables y estimada mediante exploración y muestreo. Dentro de los Recursos Minerales se podrían definir Reservas Minerales a partir de una evaluación detallada y aplicación de modificadores operativos. Los Recursos Minerales están basados en información obtenida mediante técnicas apropiadas de diferentes ubicaciones tales como afloramientos, trincheras, pits, labores y taladros.

Joint Ore Reserves Committee (2012) señala que el modelo de recursos es el punto de partida para poder estimar las Reservas Minerales. Según este código, los Recursos Minerales deben tener “perspectivas razonables de eventual extracción económica”, lo que implica que la persona a cargo de la estimación de recursos (sea una persona competente o no) debe emitir un juicio, aunque preliminar, de la viabilidad técnica y económica del recurso. En este sentido, un Recurso Mineral no es un simple inventario de toda la mineralización perforada o muestreada o reconocida, sin importar la ley de corte, posibles dimensiones de minado, ubicación o continuidad., sino una estimación realista de la mineralización que, bajo condiciones técnicas y económicas que se asumen justificables, podrían convertirse en económicamente extraíbles.

2.1.2.1 Recurso mineral inferido. Joint Ore Reserves Committee (2012) señala que un Recurso Mineral Inferido es aquella parte del Recurso Mineral para la cual, la cantidad y ley o calidad son estimadas en base a una evidencia geológica y muestreo limitados. La evidencia geológica es suficiente para presuponer, pero no verificar la continuidad de la geología o de la calidad de la mineralización.

Un Recurso Mineral Inferido tiene un nivel de confianza menor que el Recurso Mineral Indicado y no debe ser convertido a Reserva Mineral. Es razonablemente esperado que la mayoría de los Recursos Minerales Inferidos puedan ser convertidos a Recursos Minerales Indicados mediante la exploración continua.

2.1.2.2 Recurso mineral indicado. Joint Ore Reserves Committee (2012) define a un Recurso Mineral Indicado es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley, densidad, forma y características físicas son estimadas con confianza suficiente para permitir la aplicación de factores modificadores que puedan soportar un planeamiento de minado a detalle y una evaluación de la viabilidad económica del depósito. La evidencia geológica es derivada de exploración, muestreo y pruebas adecuadamente detalladas y confiables, y es suficiente para asumir la continuidad geológica y de la ley entre los puntos de observación.

Un Recurso Mineral Indicado tiene un nivel de confianza menor que el Recurso Mineral Medido y puede ser convertido a Reserva Mineral Probable únicamente.

2.1.2.3 Recurso mineral medido. Joint Ore Reserves Committee (2012) establece que un Recurso Mineral Medido es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley, densidad, forma y características físicas son estimadas con suficiente confianza para permitir la aplicación de factores modificantes que puedan soportar un planeamiento de minado a detalle y una evaluación final de la viabilidad económica del depósito. La evidencia geológica es derivada de exploración, muestreo y pruebas detalladas y confiables, y es suficiente para confirmar la continuidad geológica y de ley o calidad entre los puntos de observación.

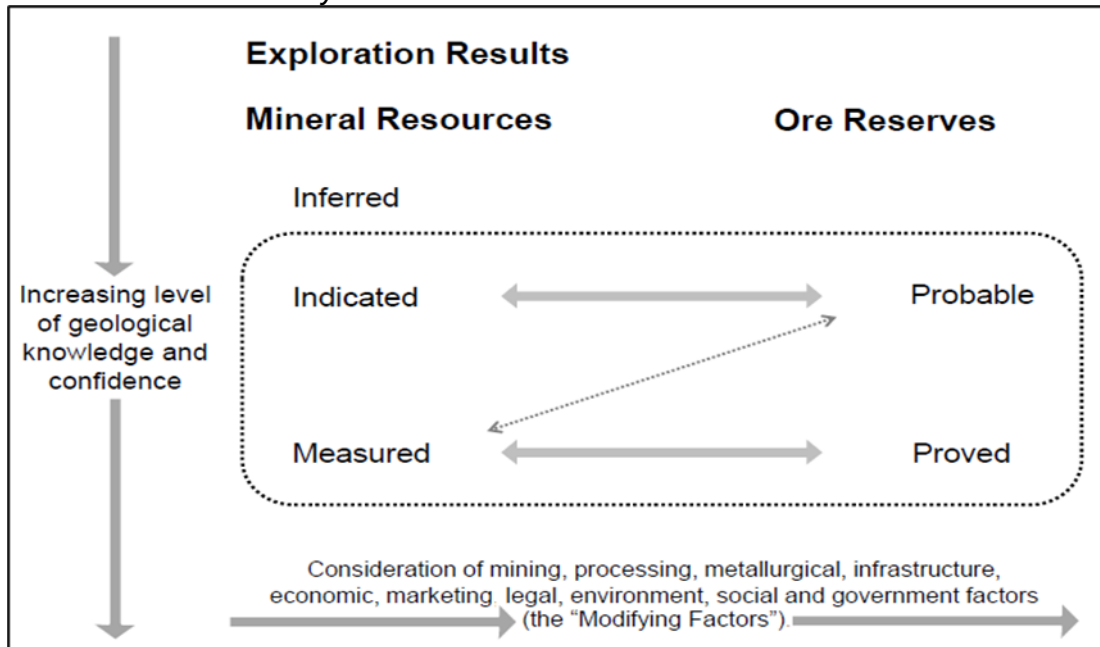
Un Recurso Mineral Medido tiene un nivel de confianza más alto que el Recurso Mineral Indicado o el Recurso Mineral Inferido. Este puede ser convertido a Reserva Mineral Probada o Reserva Mineral Probable cuando exista incertidumbre en relación con los modificadores operativos a ser aplicados (falta de data metalúrgica, o data geomecánica, o permisos sociales, etc.).

Por su parte, la Reserva Mineral es la parte económicamente explotable de un Recurso Medido y/o Indicado. Incluye material marginalmente económico y material de dilución, considera también pérdidas incurridas durante el minado o la extracción, y se sustenta en estudios de Pre-Factibilidad o Factibilidad, en los cuales se deben considerar la aplicación de modificadores operativos, demostrando que, al momento de reportar, la extracción podría ser razonablemente justificada.

Las Reservas Minerales se subdividen en orden creciente de confianza en Reserva Mineral Probable y Reservas Mineral Probada.

Figura 7

Clasificación de Recursos y Reservas Minerales



Fuente: Joint Ore Reserves Committee, AUSIMM (2012)

2.1.2.4 Reserva mineral probable. Joint Ore Reserves Committee (2012) indica que una Reserva Probable es la porción económicamente minable de los Recursos Indicados y en algunos casos de los Recursos Medidos. Es por ello, que la confiabilidad

de los modificadores operativos aplicados tiene un nivel más bajo que los aplicados sobre las Reservas Probadas, pero tienen una calidad suficiente para servir de base para tomar la decisión de llevar a cabo un proyecto.

2.1.2.5 Reserva mineral probada. Joint Ore Reserves Committee (2012) define a Reserva Probada como la porción económicamente minable de los Recursos Medidos e implica un alto nivel de confiabilidad en la continuidad geológica y de leyes, y en los modificadores operativos utilizados. Por ello, las Reservas Probadas son la base del planeamiento de mina y, al igual que las Reservas Probables, son utilizadas para tomar la decisión de llevar a cabo un proyecto. El uso de un tipo de reserva es indistinto en las evaluaciones económicas, pero lógicamente se espera que la proporción de Reservas Probadas se incremente con el avance de los estudios.

2.1.3 Factores modificadores operativos

Joint Ore Reserves Committee (2012) establece que estos factores son comúnmente denominados “modificadores operativos” y deben ser identificados y definidos antes de la estimación de Reservas Minerales, ya que son ellos los que demostrarán que la extracción es viable y justificable. El soporte de estos factores debe, al menos, corresponder a un nivel de Pre-Factibilidad según los estándares establecidos por dicho código.

Los modificadores operativos que se consideran típicamente en la conversión de Recursos Minerales a Reservas Minerales incluyen, entre otros, la continuidad geológica, parámetros geomecánicos para el diseño de mina, método de minado, cut off, dilución, recuperaciones metalúrgicas, términos comerciales, proyección de precio de metales, gastos administrativos, evaluaciones de impacto ambiental, influencias sociales y culturales.

2.1.4 Valor punto

Rudenno V. (2009), *The Mining Valuation Handbook: Mining and Energy Valuation for Investors and Management*, señala que el valor punto es un factor que se obtiene al deducir los términos comerciales aplicables a los concentrados que salen de la planta de

tratamiento. Este factor está expresado en dólares de beneficio por unidad de ley y representa el valor del metal pagable por unidad representativa del mismo. El cálculo del valor punto dependerá de los siguientes parámetros:

- Precio de metal
- Pagables
- Costo de refinación o tratamiento de concentrados (maquila)
- Deducciones
- Penalidades
- Leyes de cabeza y tonelajes proyectados en la vida de la mina.

2.1.5 Precio del metal

Joint Ore Reserves Committee (2012) establece que los precios de los metales (commodities) utilizados para reportar Recursos y Reservas Minerales deben estar fundamentados en un rango de precios razonables, sostenibles y proyectados a largo plazo, establecidos a partir de un consenso técnico-económico. Estos valores deben reflejar condiciones de mercado creíbles, y generalmente son proporcionados por el área de finanzas de la empresa minera, con base en estimaciones de bancos de inversión y entidades financieras especializadas. En caso de que los precios utilizados para estimar Recursos Minerales difieren de los usados para reportar Reservas Minerales, dichas diferencias deben estar documentadas y justificadas.

En este caso de estudio, esta mina subterránea hipotética utilizará un único precio de metal para estimar tanto Recursos Minerales como Reservas Minerales, con la finalidad de evitar distorsiones durante el proceso de conversión.

2.1.6 Parámetros metalúrgicos

Lamberg P. (2011), Geometallurgy: Towards a Better Understanding of Deposit Variability and Its Impact on Mineral Processing, indica que los parámetros metalúrgicos usualmente se obtienen a partir de los partes metalúrgicos históricos, siempre que las leyes y características mineralógicas del mineral de cabeza de los partes históricos se asemejen al mineral que se proyecta explotar.

Cuando se compruebe que las recuperaciones metalúrgicas son sensibles a cambios en la ley de cabeza (u otra propiedad del mineral de cabeza como pueden ser la presencia de contaminantes), se recomienda desarrollar fórmulas polinómicas que puedan predecir con mayor precisión tanto las recuperaciones metalúrgicas como la ley de concentrado. Estas fórmulas, que pueden ser de carácter cuadrático, son generadas a través de un modelo geometalúrgico que, una vez implementado, mejora el planeamiento de mina y por consiguiente ayudará a controlar el impacto en la performance de la planta ante la variabilidad de las leyes.

Generalmente se formula una expresión para cada tipo de mineral o dominio geológico. Las leyes de cabeza que deben ser consideradas para determinar la recuperación metalúrgica son aquellas que más se asemejen a las leyes de corte, a fin de lograr una discriminación más precisa entre los bloques económicos y no económicos.

2.1.7 Net smelter return (NSR)

Goldie R. (1991), How to Evaluate an Orebody, define el Net Smelter Return (NSR) o Retorno Neto de la Fundición como una medida del valor de la mena que permite determinar el ingreso neto que se recibe por la venta de la producción descontando todos los costos mina correspondientes al transporte, tratamiento y venta de los productos minerales (considerando términos comerciales).

Entre las ventajas del cálculo del NSR se encuentra su capacidad para ofrecer, de manera rápida y transparente, lo siguiente:

- Estimar el valor de cierto sector de la mina
- Calcular los ingresos de diferentes planes de minado
- Definir la conveniencia de enviar un material a la planta, stockpile o botadero.
- Llevar a cabo ejercicios de sensibilidad para diferentes precios de metal.
- Lograr una mejor definición de mineral o desmonte en operaciones polimetálicas.

El NSR estará expresado en dólares de beneficio por tonelada de mineral (US\$/t), y es el resultado de una sumatoria, en la cual cada sumando este compuesto por el producto de los siguientes factores: Ley de metal, Recuperación Metalúrgica (que puede

estar como valor fijo o en función de la ley del metal) y el Valor Punto (como función del precio del metal y términos comerciales).

$$NSR = \sum_i^k L_i * RM(i) * VP_i$$

Donde:

NSR = Net Smelter Return (US\$/t)

L = Ley de metal (Oz/t, en caso de una mina de Oro)

RM = Recuperación metalúrgica (%)

VP = Valor Punto (US\$/Oz/t, en caso de una mina de Oro)

K = Número máximo de metales en el block

i = Índice de sumatoria que representa cada metal del block (1, 2, 3, ..., K)

2.1.8 Utilidad operativa

Runge I. (1998), Mining Economics and Strategy, señala que toda empresa o negocio tiene como objetivo maximizar sus beneficios y, por ende, su rentabilidad. En el caso del negocio minera, se persigue el mismo propósito. Los beneficios o pérdidas directas asociadas a la producción de una tonelada de material se estiman considerando los ingresos y costos asignados directamente a las actividades de minado, procesamiento y administración.

La utilidad unitaria esperada U por tonelada de material puede expresarse como:

$$U = NSR - (M_T + P_T + O_T)$$

Dónde:

U = Utilidad de una tonelada de material (US\$/t)

NSR = Valor de una tonelada de material (US\$/t)

M_T = Costo total de minado (US\$/t)

P_T = Costo total de procesamiento (US\$/t)

O_T = Costo total de servicios y administrativos (US\$/t)

2.1.9 Cut off

Rendu J. (2014), *An Introduction to Cut Off Grade Estimation*, define al cut off como un umbral económico expresado en términos de US\$/t, que determinará la viabilidad de extracción y procesamiento de un cuerpo mineral. Este parámetro crítico se utiliza para clasificar el material dentro de un yacimiento en mineral o estéril, lo que a su vez fundamenta la planificación estratégica de la mina a largo plazo (Life of Mine Plan, Plan LOM). Desde una perspectiva técnica, el cut off se corresponde con el valor mínimo de Retorno Neto por Fundición (NSR) necesario para que una unidad de mineral sea económicamente explotable. Este valor se establece considerando que, al deducir los costos operativos y de comercialización de los ingresos generados por la venta del producto final, se alcanza el punto de equilibrio económico.

Según Rendu J. (2014), la estimación precisa del cut off requiere la inclusión de todos los costos relevantes asociados a las operaciones mineras, tales como perforación, muestreo, voladura, carguío, extracción, chancado, molienda, flotación, filtrado y secado, fundición y refinación. Estos costos representan la totalidad de las actividades necesarias para la conversión del mineral en un producto final comercializable. Es crucial excluir de esta estimación los costos de capital inicial, depreciación de equipos, amortización, así como los gastos administrativos corporativos, impuestos y otros gastos indirectos que no estén directamente vinculados con la operación diaria de la mina.

El cálculo del cut off también debe considerar las particularidades operacionales, incluyendo los costos operativos fijos y variables, que engloban no solo los relacionados con el minado y procesamiento, sino también los gastos administrativos directos de la mina y los costos de ventas directas. Esto incluye mano de obra, materiales e insumos, mantenimiento, transporte, almacenamiento, etc.

Es fundamental reconocer que el cut off puede variar dentro de un mismo proyecto, especialmente cuando se emplean múltiples métodos de minado o cuando la configuración geológica y operativa de la mina implica diferencias significativas en costos. En estos casos, se recomienda calcular cut off's diferenciados para cada método de minado o para

cada sector de la mina tomando en cuenta factores como condiciones geomecánicas, eficiencia de los sistemas de extracción, etc.

La determinación del cut off no solo afecta la cuantificación de las reservas minerales, sino que también tiene un impacto directo en la rentabilidad del proyecto y en la vida útil de la mina. Un enfoque adecuado para su cálculo es esencial para maximizar el valor económico del proyecto, garantizando que los recursos se utilicen de manera óptima y que las decisiones estratégicas se basen en fundamentos económicos sólidos. A continuación, se describen os diferentes tipos de cut off.

2.1.9.1 Cut off económico. Dimitrakopoulos R. (2011), Strategic Risk-Based Mine Planning and Design, indica que el cut off económico es aquel costo expresado en US\$/t cuyo valor por tonelada justifica su explotación y beneficio, considerando que, al deducir los costos totales de producción y comercialización, los ingresos por ventas del producto final resulten en el punto de equilibrio. Este enfoque busca maximizar la rentabilidad de la operación, puesto que se asegura que el minado cubra la totalidad de costos asociados a la explotación, procesamiento y comercialización del mineral.

Si deseamos estimar un cut off económico, que cubra todos los costos operativos, basta con igualar la ecuación de utilidad operativa a cero, resultando en una expresión del cut off independiente de los costos, como se muestra a continuación:

$$CO \text{ Económico (US\$ / t)} = (M_T + P_T + O_T)$$

Dónde:

M_T = Costo total de minado (US\$/t)

P_T = Costo total de procesamiento (US\$/t)

O_T = Costo total de servicios y administrativos (US\$/t)

2.1.9.2 Cut off marginal. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, define el cut off marginal, expresado en US\$/t, como el valor mínimo por tonelada que justifica la explotación al cubrir únicamente los costos operativos variables. Este tipo de cut off es inferior al económico conduce a una estimación de

mayores reservas, aunque con una ley promedio más baja. Su aplicación es común cuando se busca maximizar reservas minerales, ya sea para justificar inversiones, demostrar un incremento en las reservas de una mina, o cumplir con acuerdos de suministro a largo plazo. Sin embargo, es importante reconocer que un cut off más bajo, si bien permite la explotación de zonas con menor ley o NSR, puede reducir el valor económico global de la mina. Este criterio, suele aplicarse cuando existe capacidad ociosa en la planta de procesos, permitiendo tratar mineral que al menos cubre su costo directo de explotación, sin desplazar mineral más rentable.

Para estimar un cut off marginal que cubra los costos variables operativos de producción, procesamiento y servicios, se iguala la ecuación de utilidad a cero resultando:

$$CO \text{ Marginal (US\$ / t)} = (M_V + P_V + O_V)$$

Dónde:

M_V = Costo variable de minado (US\$/t)

P_V = Costo variable de procesamiento (US\$/t)

O_V = Costo variable de servicios y administrativos (US\$/t)

2.1.9.3 Break even cut off. Rendu J. (2014), An Introduction to Cut Off Grade Estimation, define el breakeven cut off como el valor en US\$/t en el que los ingresos generados cubren exactamente todos los costos, resultando en una ganancia neta de cero. Este modelo es esencial en la planificación minera, ya que proporciona una referencia clara para determinar el punto de equilibrio económico. Aunque se trata de un enfoque simplificado, que no considera la distribución de ley y tonelaje del depósito ni las capacidad de producción, su aplicabilidad práctica lo convierte en una herramienta valiosa en la toma de decisiones dentro de la industria minera.

2.1.9.4 Cut off óptimo. Hall B. (2012), Cut off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan, define el cut off óptimo como un parámetro crítico en la planificación minera, correspondiente al valor en US\$/t que maximiza el beneficio económico total de un proyecto minero a lo largo de su vida útil. A diferencia de otros tipos de cut off, como el

económico o el marginal, el cut off óptimo no se limita a cubrir costos o maximizar reservas, sino que se enfoca en optimizar el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, considerando de forma integral los ingresos y los costos asociados dentro de un horizonte temporal completo.

La determinación del cut off óptimo implica un análisis exhaustivo de múltiples variables económicas y técnicas. Estas incluyen las fluctuaciones en los precios de los metales, los costos de operación, la tasa de descuento, la secuencia de explotación, leyes de mineral, etc. Además, es crucial considerar el impacto temporal y riesgo de las decisiones, donde la explotación prematura de zonas de alta ley puede generar beneficios a corto plazo, pero podría comprometer el valor económico futuro del proyecto.

Tal como indica Hall B. (2012), metodológicamente, el cálculo del cut off óptimo suele requerir el uso de modelos y técnicas de optimización. Estos enfoques permiten evaluar diferentes escenarios operacionales, identificando la estrategia de explotación que maximiza el VAN. En este contexto, el cut off óptimo se ubica típicamente por encima del break even cut off y del cut off económico, al priorizar la rentabilidad a largo plazo sobre la simple cobertura de costos o la maximización de las reservas minerales.

2.1.10 Método de minado

Nicholas D. (1993), *Mining Method Selection: A Decision Support System*, propone una metodología ampliamente utilizada para la selección de métodos de explotación, que incluye una matriz técnica de selección y un análisis cualitativo-cuantitativo de alternativas preseleccionadas. En estudios previos del proyecto tratado en esta tesis, como los de ingeniería conceptual y prefactibilidad, se aplicó dicha metodología para evaluar opciones de explotación. Como resultado, se determinó que el método más adecuado para la explotación de las vetas del yacimiento en estudio es el método de Tajeo por taladros largos (Bench and Fill - B&F) en la variante longitudinal.

Además, Hustruild W. (2001), *SME Mining Engineering Handbook*, señala que la selección del método de explotación debe fundamentarse principalmente en la geometría

del cuerpo mineralizado y en las condiciones geomecánicas del yacimiento, criterios que respaldan la elección adoptada en este estudio.

2.1.11 Tajeo por taladros largos (*Bench and Fill*)

2.1.11.1 Diseño mina. Hamrin H. (2001), *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, señala que la implementación del método Bench & Fill, requiere una infraestructura adecuada que garantice eficiencia operativa y seguridad. En la presente tesis, el método de explotación lo denominaremos “Bench and Fill” al Tajeo por Taladros Largos en su variante longitudinal. La preparación contempla el desarrollo de una rampa principal desde la cual se proyectarán infraestructuras clave, tales como bypasses de extracción, cruceros, accesos, galerías, echaderos de mineral y cámaras de carguío.

Por su parte, Hartman H. (2002), *Introductory Mining Engineering*, establece lineamientos técnicos que respaldan el diseño de infraestructura subterránea como parte del desarrollo minero. Siguiendo estos criterios, la rampa principal, con una sección de 4.50m x 4.50m, permitirá el acceso a las distintas infraestructuras proyectadas. El bypass, ubicado aproximadamente a unos 40 metros de la veta, cumple la función de vía de tránsito para los volquetes de extracción, mejorando la eficiencia operativa. Desde allí, se trazan accesos con un gradiente de $\pm 15\%$ hacia la estructura mineralizada. Asimismo, las galerías, construidas en los niveles y subniveles, delimitarán los bancos de producción y tendrán secciones de 3.50m x 3.50m.

2.1.11.2 Parámetros geomecánicos. Hustruild W. (2001), *SME Mining Engineering Handbook*, resalta que los parámetros geomecánicos son fundamentales para el diseño e implementación del método de minado, y que deben estar respaldados por estudios de prefactibilidad. Entre los factores geomecánicos críticos se consideran:

- **Radio hidráulico:** Según Brady B. (2006), este parámetro es fundamental para el dimensionamiento de los tajeos, influyendo en la estabilidad y la eficiencia de la explotación.

- **Sistema de reforzamiento:** Hoek E. et al. (2000) destacan su importancia en el cálculo de costos operativos y en la estabilidad general de las excavaciones.
- **Diseño de pilares y puentes:** Hustruild W. (1999) señala que este aspecto incide en la recuperación de mineral como en la seguridad operacional, siendo clave para minimizar pérdidas significativas y preservar la integridad estructural del yacimiento

El diseño de la mina también considera parámetros geomecánicos y geométricos relacionados con las rocas encajonantes y la estructura mineralizada. Estos parámetros son esenciales para la optimización del método B&F y están detallados en la Tabla 2.

Tabla 2

Condiciones geomecánicas para tajeos por taladros largos

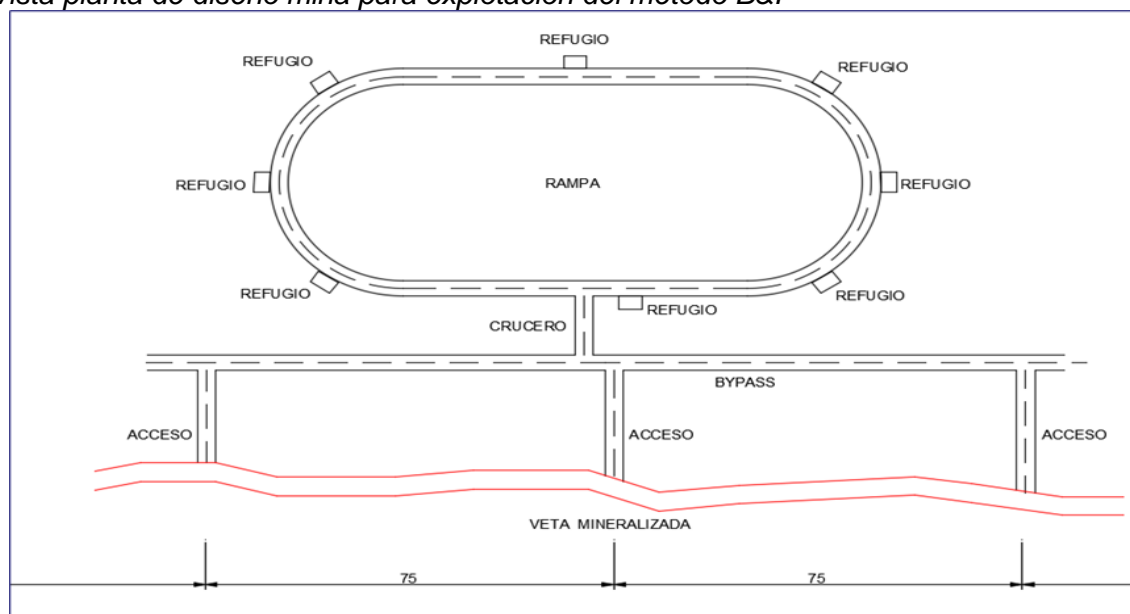
ÍTEM	CRITERIO	CONDICIONES OPERATIVAS
1	Calidad de rocas encajonantes	De Regular A Mala A, con RMR de 55 a 35.
2	Calidad del mineral	De Regular A Mala A, con RMR de 55 a 35.
3	Buzamiento de la veta	Usual de 70° a 80°, con variaciones de 50° a 60°
4	Potencia de la veta	De 2.00m a 10.00m
5	Altura de banco	De 16.00m

Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

Con las infraestructuras y consideraciones geomecánicas descritas, la mina estará preparada para la explotación eficiente de los bancos mineralizados de altura de 16 metros.

Figura 8

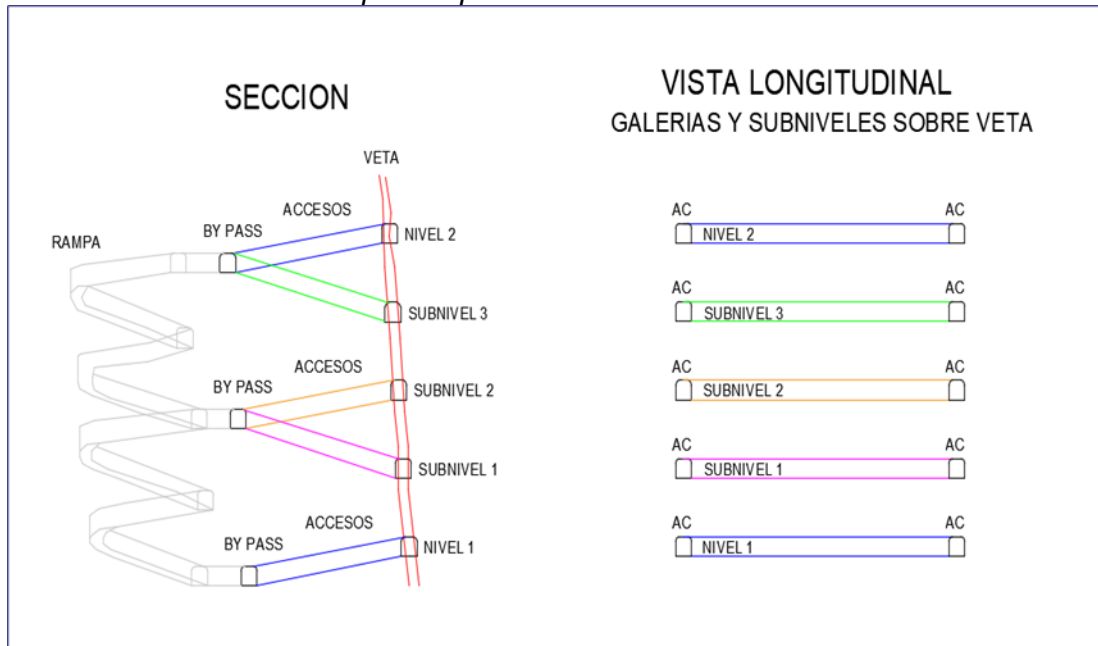
Vista planta de diseño mina para explotación del método B&F



Fuente: Introductory Mining Engineering, Hartman H. (2002)

Figura 9

Vista sección de diseño mina para explotación del método B&F



Fuente: Introductory Mining Engineering, Hartman H. (2002)

2.1.11.3 Ciclo de minado. Hustruild W. (2001), SME Mining Engineering Handbook, indica que la correcta implementación del método Bench and Fill (B&F) requiere un ciclo de minado estructurado y detallado, que asegure la máxima recuperación de mineral y la estabilidad de las excavaciones. Este ciclo considera etapas secuenciales que incluyen perforación, voladura, limpieza de mineral y relleno del banco explotado, las cuales deben ejecutarse de manera coordinada y continua. En el presente estudio, dichas fases operativas han sido adaptadas a las condiciones geomecánicas y geométricas del yacimiento, lo que permite optimizar tanto la seguridad como el rendimiento del método. A continuación, se detalla cada una de las actividades esenciales que conforman el ciclo del método de minado Bench and Fill:

2.1.11.3.1 Perforación. Hustruild W. (2001), SME Mining Engineering Handbook, señala que la perforación para producción debe realizarse con un equipo electrohidráulico de taladros largos, operando de forma vertical y continua en cada subnivel.

Para este proyecto en estudio el espaciamiento entre taladros variará entre 1.50m a 1.80m, en función de la potencia de la veta: para potencias menores a 3.00m, se empleará un espaciamiento de 1.50m, mientras que para potencias mayores se aplicará

un espaciamiento de 1.80m. La disposición de los taladros será diseñada en forma radial procurando el control de la caja techo y cubriendo toda la sección económicamente explotable.

2.1.11.3.2 Voladura. Chandler N. (1994), Practical Guide for Controlled Blasting in Underground Mines, describe los procedimientos estándar para voladuras controladas, los cuales serán aplicados en este caso para garantizar una fragmentación eficiente del mineral, minimizar la sobreexcavación y reducir los daños en las estructuras geotécnicas adyacentes. La operación de voladura se realizará mediante la carga de taladros previamente perforados con ANFO como explosivo principal, aprovechando su alta eficiencia y bajo costo. Como sistema de iniciación, se utilizarán cebos de dinamita enlazados a mangueras explosivas FANEL, que permiten una transferencia confiable de la señal de detonación y una secuencia de disparo controlada.

Esta configuración busca generar una rotura progresiva y uniforme del macizo rocoso, facilitando la posterior limpieza de mineral y reduciendo daños en las estructuras adyacentes.

2.1.11.3.3 Limpieza de mineral. Villarroel J. (2015), Método de explotación Bench and Fill y su aplicación en minería subterránea, detalla que luego de la voladura, se lleva a cabo la limpieza del mineral, esta actividad se realiza en el subnivel inferior del tajeo, empleando scooptrams de 6.3yd³ operados a control remoto para trasladar el mineral desde el tajo hasta cámaras de acumulación. Luego, el mineral será dispuesto hacia chimeneas de transferencia de mineral o se cargará directamente en volquetes, dependiendo de la configuración del sistema minero.

2.1.11.3.4 Relleno de espacios vacíos. Hoek E. et al. (2000), Support of Underground Excavations in Hard Rock, recomiendan realizar el relleno de los espacios vacíos generados por la explotación, una vez finalizada la extracción de mineral. Para asegurar la estabilidad del tajeo, el span máximo deberá mantenerse entre 20m a 28m durante toda la etapa de explotación.

Esta actividad se realizará desde el subnivel superior de cada tajeo, utilizando un acceso opuesto al empleado en la limpieza del mineral. El relleno estará compuesto por material detrítico, aprovechando el desmonte generado durante el avance de las labores de exploración, desarrollo y preparación de la mina.

Integrando todos estos aspectos, se puede describir de forma articulada el ciclo de minado del método Taladros Largos en su variante Bench and Fill.

Hustruild W. (2001), SME Mining Engineering Handbook, detalla que el proceso de explotación inicia con la perforación de los taladros verticales desde los extremos hacia el centro del banco, utilizando un equipo de perforación de taladros largos.

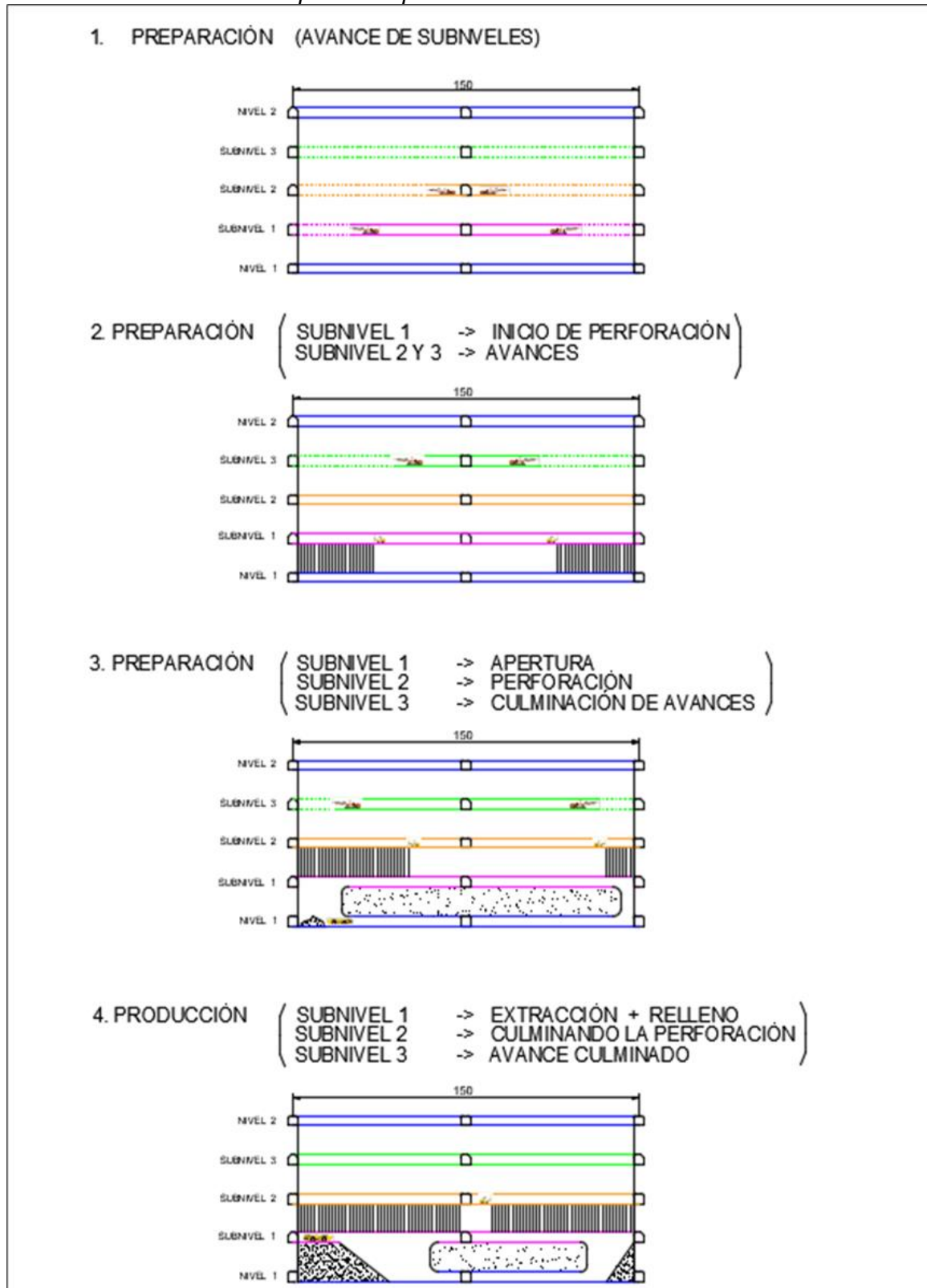
Una vez concluida la perforación, se ejecuta la voladura del tajeo, ejecutándose en retirada desde los extremos y de acuerdo con el volumen de mineral requerido para la producción diaria.

Luego, el mineral es extraído a través del acceso central del tajeo ubicado en el subnivel inferior. La perforación, voladura y limpieza se continuarán ejecutándose de forma secuencial hasta que el espacio abierto alcance la distancia límite del span máximo. Una vez alcanzado el span máximo, se iniciará de manera simultánea con la actividad de limpieza de mineral, el relleno del tajeo utilizando material detrítico, con el objetivo de mantener la estabilidad estructural. Al concluir con la limpieza del mineral, se completará el relleno para restituir el piso del segundo subnivel, permitiendo la continuidad de las operaciones.

La Figura 10 ilustra el ciclo integrado de perforación, voladura, limpieza y relleno, evidenciándose su ejecución secuencial y sistemático hasta completar la explotación completa del último tajeo dentro del bloque diseñado.

Figura 10

Ciclo de minado del método para la explotación del método B&F



Fuente: Método de explotación Bench and Fill y su aplicación en minería subterránea, Villarroel J. (2015)

2.1.12 Recuperación minera

SME (2018), Mineral Property Evaluation, describe la recuperación minera como el porcentaje de la estructura mineralizada que se extrae en relación con la zona explotable, considerando el método de minado utilizado. Este porcentaje es independiente a la recuperación de puentes y pilares y se ve afectado por los parámetros operativos inherentes al método de minado seleccionado, lo que influye directamente en el tonelaje final extraído.

Dentro de este contexto, se identifican diferentes tipos de recuperación minera, que dependen de factores específicos del proceso de explotación. A continuación, se describen los principales tipos de recuperación minera en el método de B&F.

2.1.12.1 Recuperación minera por limpieza. SME (2018), Mineral Property Evaluation, indica que en el método de minado por B&F, es inevitable una pérdida mínima de mineral durante el proceso de limpieza. Esta pérdida se debe a la irregularidad del piso. Provocada por la disposición del relleno detrítico empleado en la etapa de minado anterior. Estas condiciones impiden realizar una limpieza completa, lo que afecta la recuperación total del mineral durante la extracción.

2.1.12.2 Recuperación minera por perforación y voladura. SME (2018), Mineral Property Evaluation, señala que el método de minado B&F también presenta desafíos en términos de recuperación minera debido a las sinuosidades de la veta y las desviaciones que pueden ocurrir durante la perforación de taladros perforados para la producción en bancos. Estas variaciones pueden dar lugar a la pérdida de mineral en las cajas, lo que reduce la eficiencia del proceso de voladura y, por ende, la recuperación total del mineral.

2.1.13 Dilución de mineral

SME (2018), Mineral Property Evaluation, define la dilución en minería como un concepto crítico que impacta directamente en la económica de una operación minera, y se refiere a la proporción de desmonte presente en la carga extraída que se procesará (a esto

le denominaremos porcentaje de dilución). Esta dilución puede disminuir significativamente la ley del mineral, afectando el rendimiento global. Para su análisis, se emplea la formula:

$$\% Dil = \frac{\text{masa de desmonte}}{\text{masa de mineral} + \text{masa de desmonte}} \times 100$$

2.1.13.1 Mineral diluido. SME (2018), Mineral Property Evaluation, explica que el mineral diluido es la adición de una cantidad determinada de material de desmonte a los recursos de mineral estimados (Desmonte + Mineral de Recursos), generando un incremento en el tonelaje de este mineral, por dicho agregado de desmonte se sufre una pérdida en su calidad. Este material de desmonte se debe a factores de diseño de explotación y factores operativos. Esta adición trata de representar la realidad al momento de realizar la explotación de dicho material, por lo cual se debe considerar todas las posibles diluciones, ya sean las diluciones que se pueden controlar de manera operativa como las que no se pueden controlar de forma operativa, pero que sean representativas de la realidad al momento de ser explotados. Por lo tanto, tenemos que las toneladas de mineral diluidas se definirán como:

$$TM_{Dil} = TM_{\text{mineral}} + TM_{\text{desmonte}}$$

Relacionando las fórmulas anteriores, tenemos que:

$$TM_{Dil} = \frac{TM_{Min}}{(1 - \%Dil)}$$

Y para el cálculo de leyes diluidas utilizaremos las siguientes relaciones:

$$Ley_{Dil} = Ley_{Geo} * (1 - \%Dil)$$

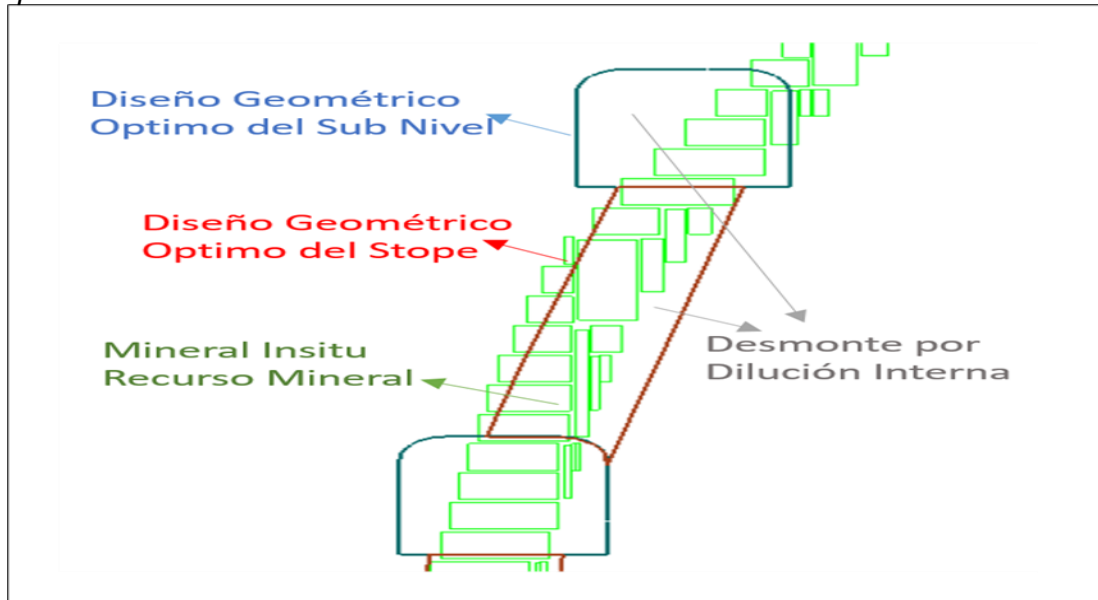
Es importante indicar que Pakalnis R. et al (1995) clasifican la dilución en dos categorías principales, dependiendo de su origen y del control operativo que se pueda ejercer sobre ella:

2.1.1.3.2 Dilución interna (Dil_{int}). Pakalnis R. (1995), Quantifying the Cost of Dilution in Underground Mines, señala que la dilución interna es la adición de desmonte del cual tienes que incurrir de manera obligatoria. Para poder obtener el mayor valor del mineral explotado se debe lograr la extracción de la mejor calidad de mineral, lo cual quiere

decir, mientras sea menor la dilución con que se extraiga dicho mineral, este será de mayor valor o mayor NSR. Para lograr ese efecto tienes que realizar un diseño geométrico óptimo para poder obtener la menor dilución posible.

Figura 11

Esquema de dilución interna



Fuente: Mineral Property Evaluation, SME (2018)

2.1.13.3 Dilución externa (Dil_{ext}). Bullock R. (2001), Engineering Fundamentals and International Case Studies, describe la dilución externa es la adición de desmonte que se genera por factores operativos. Una vez realizado el diseño geométrico óptimo, la acción misma de la operación generará una dilución externa a este diseño geométrico óptimo. Las tres principales fuentes son:

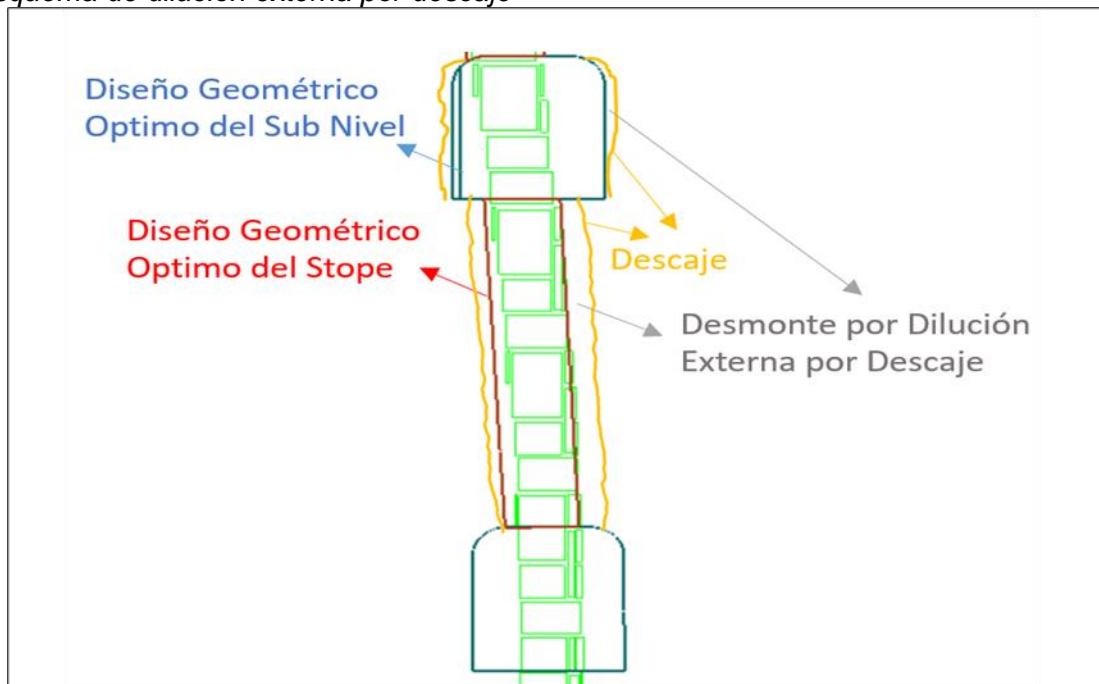
2.1.13.3.1 Dilución externa por descaje (Dil_{ext-d}). Bullock R. (2001), Engineering Fundamentals and International Case Studies, explica que la dilución externa por rotura es la adición de desmonte que se genera por el desprendimiento de material inerte fuera del diseño geométrico. Esto se debe por el uso de explosivos que perturban la masa rocosa que envuelve el diseño geométrico óptimo.

El grado de desprendimiento dependerá de la calidad del macizo rocoso que es afectado por la acción de la voladura. Esta dilución se define como:

$$\%Dil_{ext-d} = \frac{TM \text{ desmonte por descaje}}{TM_{Dil}}$$

Figura 12

Esquema de dilución externa por descaje



Fuente: Mineral Property Evaluation, SME (2018)

2.1.13.3.2 Dilución externa por limpieza (Dil_{ext-l}). Bullock R. (2001), Engineering Fundamentals and International Case Studies, indica que esta dilución externa por limpieza es la adición de desmorte, en calidad de relleno, el cual se incluye en la fase de limpieza de mineral que yace sobre el relleno aplicado en el tajo de mineral explotado en el ciclo anterior. Esta dilución se define como:

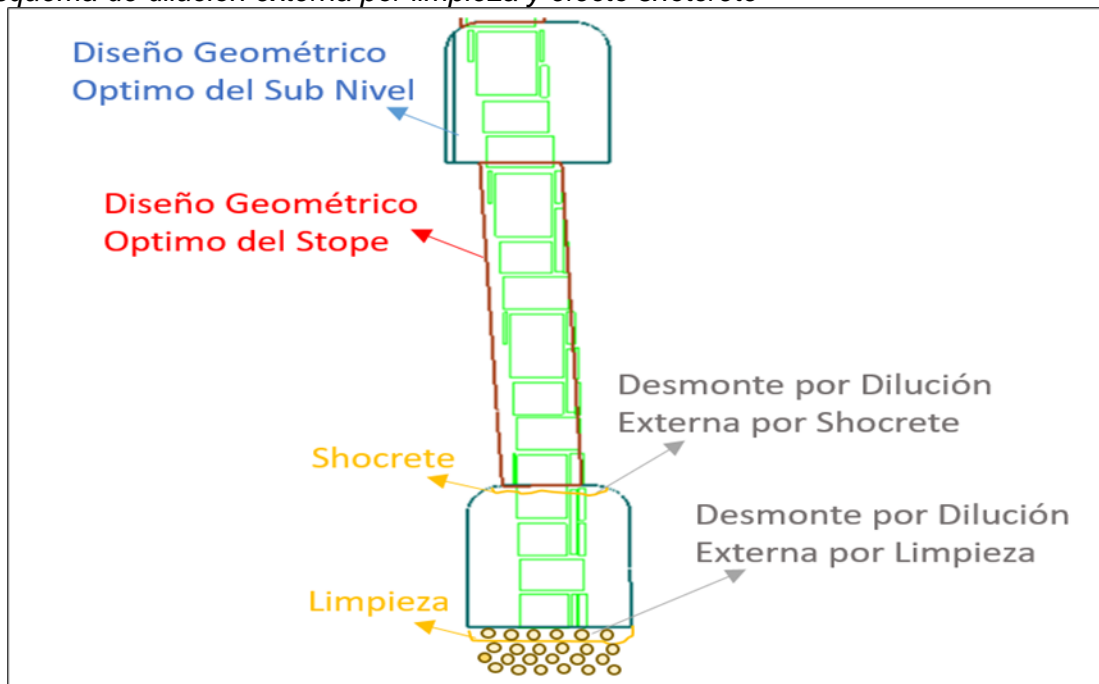
$$\%Dil_{ext-l} = \frac{TM \text{ desmorte por limpieza}}{TM_{Dil}}$$

2.1.13.3.3 Dilución externa por shotcrete (Dil_{ext-s}). Villaescusa E. (2004), Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping, identifica que esta dilución externa por shotcrete es la adición de desmorte que corresponde al tonelaje de concreto que contamina el mineral debido a la rotura del shotcrete por efecto de la voladura, shotcrete que fue aplicado en la corona y parte de los hastiales del subnivel como parte de sostenimiento. Esta dilución se define como:

$$\%Dil_{ext-s} = \frac{TM \text{ desmorte por shotcrete}}{TM_{Dil}}$$

Figura 13

Esquema de dilución externa por limpieza y efecto shotcrete



Fuente: Mineral Property Evaluation, SME (2018)

Los factores de dilución estimados se suman obteniendo el porcentaje de dilución total que en adelante solo lo llamaremos “dilución”:

$$\% Dil = \%Dil_{int} + \%Dil_{ext}$$

Siendo:

$$\% Dil_{ext} = \%Dil_{ext-d} + \%Dil_{ext-l} + \%Dil_{ext-s}$$

2.1.14 Ritmo de producción (ROP)

Hustruid W. (2001), SME Mining Engineering Handbook, describe al ritmo de producción o también denominado ROP (por sus siglas en inglés, Rate of Production) como uno de los parámetros más importantes en la evaluación de un depósito mineral y que influyen el diseño y el éxito económico de un proyecto.

Runge I. (1998), Mining Economics and Strategy, señala que el ritmo de producción está directamente relacionado con la vida útil de la mina, la cual se estima dividiendo las reservas minerales con el ritmo de producción anual. Una estimación incorrecta puede conducir al rechazo indebido de proyectos o a una explotación ineficiente. Asimismo, el ritmo de producción constituye un parámetro clave para la selección de los equipos mina

y dimensionamiento de la capacidad de planta, así como también la estimación de los requerimientos de mano de obra. En consecuencia, tanto los desembolsos iniciales de capital (CAPEX) y los gastos operacionales anuales (OPEX) están directamente influenciados por el ritmo de producción seleccionado.

El ritmo de producción y la vida de la mina pueden ser entendidos como sinónimos puesto que están directamente relacionados, tal como se observa:

$$\text{Vida de la mina (años)} = \frac{\text{Toneladas de reservas estimadas}}{\text{produccion diaria x dias de trabajo al año}}$$

2.1.15 Regla de Taylor

Taylor H. (1993), Selection of Mining Rate, establece una de las fórmulas más reconocidas vinculadas a las características físicas del depósito es la conocida regla de Taylor. El autor analizó numerosos proyectos mineros, algunos en operación y otros en etapa conceptual, que abarcaban un amplio rango de tamaños y geometrías de cuerpos mineralizados, cuyas reservas totales ya estaban bien definidas antes del diseño principal. A partir de este análisis, Taylor R. (1993) encontró que los ritmos de producción diarios parecían ser proporcionales a la potencia de 3/4 del tonelaje de reservas minerales, lo que dio origen a la fórmula empírica conocida como regla de Taylor:

$$\text{Produccion diaria (tpd)} = 0.017 x \sqrt[4]{\text{Reservas}^3}$$

2.1.16 Plan minero

Hustruild W. (2013), Open Pit Mine Planning and Design, define el plan minero como un conjunto estructurado de decisiones técnicas y económicas que definen como se extraerán las reservas minerales de un yacimiento a lo largo del tiempo, con el objetivo de maximizar el valor del proyecto bajo restricciones operativas, ambientales y de mercado. Este plan abarca aspectos clave como el ritmo de producción, la secuencia de explotación, el diseño de la mina, la selección de equipos, y los flujos de caja esperados, constituyendo así la base para la evaluación estratégica en las etapas de prefactibilidad y factibilidad del proyecto.

Si bien la elaboración de planes mineros detallados es una práctica común para evaluar proyectos en sus fases finales, este enfoque no será el principal objeto de esta tesis. En su lugar, el análisis se orienta hacia estrategias de optimización y evaluación global que permitan sustentar decisiones informadas sobre el desarrollo del proyecto en estudio, sin necesidad de elaborar secuencias de producción o planes de desarrollo minero con un alto nivel de detalle.

Aunque el secuenciamiento de los primeros años de producción sigue siendo un aspecto relevante, esta investigación se enfoca en métodos que permitan una evaluación eficiente y flexible del proyecto, priorizando el uso de herramientas como la metodología HoV, que permiten guiar decisiones estratégicas sin necesidad de una planificación exhaustiva desde el inicio.

2.1.17 Costo de operación (OPEX)

Hartman H. et al (2002), *Introductory Mining Engineering*, definen el OPEX (Operating Expenses o costo de operación) como los costos recurrentes de operación de la mina. Este se calcula de forma anual y comprende únicamente aquellos costos que generan beneficios durante el mismo periodo. El OPEX total por tonelada en una mina subterránea incluye todas las actividades de exploración preparación, desarrollo, extracción del mineral, relleno, y procesamiento de mineral, así como los costos de servicios asociados. También considera los costos operativos fijos, como salarios de los trabajadores y gastos administrativos.

2.1.18 Costo de capital (CAPEX)

Hartman H. et al (2002), *Introductory Mining Engineering*, definen el CAPEX (Capital Expenditure o costo de capital de inversión inicial) como el gasto que una compañía realiza en bienes antes de que el proyecto minero se considere operativo y que resultara en beneficios que garanticen y midan el crecimiento del proyecto. Este gasto se origina en la adquisición de activos fijos, activos intangibles o bien en el incremento del valor de los activos existentes.

Asimismo, Hartman H. et al (2002) distinguen el capital de sostenimiento (Sustaining CAPEX) como las inversiones efectuadas durante la etapa operativa del proyecto, destinadas a conservar los activos en condiciones adecuadas para mantener el nivel de producción originalmente diseñado, sin contemplar inversiones asociadas a aumentos en la capacidad productiva.

Si bien esta definición será la que se adopte en el proceso de optimización cut off's del presente estudio, es importante señalar que la interpretación exacta del CAPEX puede variar en función de cómo cada empresa minera defina sus criterios de valorización.

2.1.19 Estimación de costos de operación y capital

Hartman H. et al (2002), Introductory Mining Engineering, señalan que, que tanto los costos operativos como las inversiones que incluyen el capital necesario para el desarrollo y la operación inicial del proyecto representan un factor crítico para evaluar su viabilidad y optimización. Aunque el enfoque principal de esta tesis no es la estimación de costos de operación y capital, resulta esencial considerar los costos para contextualizar y complementar el análisis de HoV para cada escenario.

En esa línea, Gentry D. et al (1984), Mine Investment Analysis, destacan que existen diversos métodos disponibles para estimar los costos operativos e inversiones. Para los fines de esta investigación, se ha optado por emplear el método de ajuste exponencial de la capacidad, dado que ofrece una aproximación coherente con las características del proyecto en estudio. Este enfoque permite realizar estimaciones razonables del capital requerido en función del tamaño y la capacidad del proyecto, sin desviar la atención del objetivo central del análisis.

2.1.19.1 Ajuste exponencial entre capacidad e inversión. Williams T. (1992), Cost Estimation in Project Planning, introdujo el método de ajuste exponencial de la capacidad, también conocido como la "regla de escala" o "regla de Williams", una herramienta útil para estimar rápidamente el orden de magnitud de las inversiones en proyectos mineros. Este método asume que la inversión varía exponencialmente con la

capacidad del proyecto, y proporciona una base para evaluar el capital requerido en el marco de la optimización y planificación minera, eje central de esta investigación.

$$I = (\textit{Capacidad})^x$$

Donde:

x = Factor exponencial o de economía de escala

Capacidad = Ritmo de producción del proyecto

Por otro lado, Hartman H. et al (2002), Introductory Mining Engineering, proponen una formulación más practica para estimar como varían las inversiones cuando se incrementa la capacidad de un proyecto, siempre bajo la premisa de que se mantiene constante la tecnología y el tipo de proceso. La ecuación propuesta permite relacionar la inversión correspondiente a una determinada capacidad instalada con la que sería necesaria para una capacidad diferente empleando una función de tipo potencia. Dicha expresión se presenta como:

$$I_2 = I_1 * \left(\frac{\textit{Capacidad}_2}{\textit{Capacidad}_1} \right)^x$$

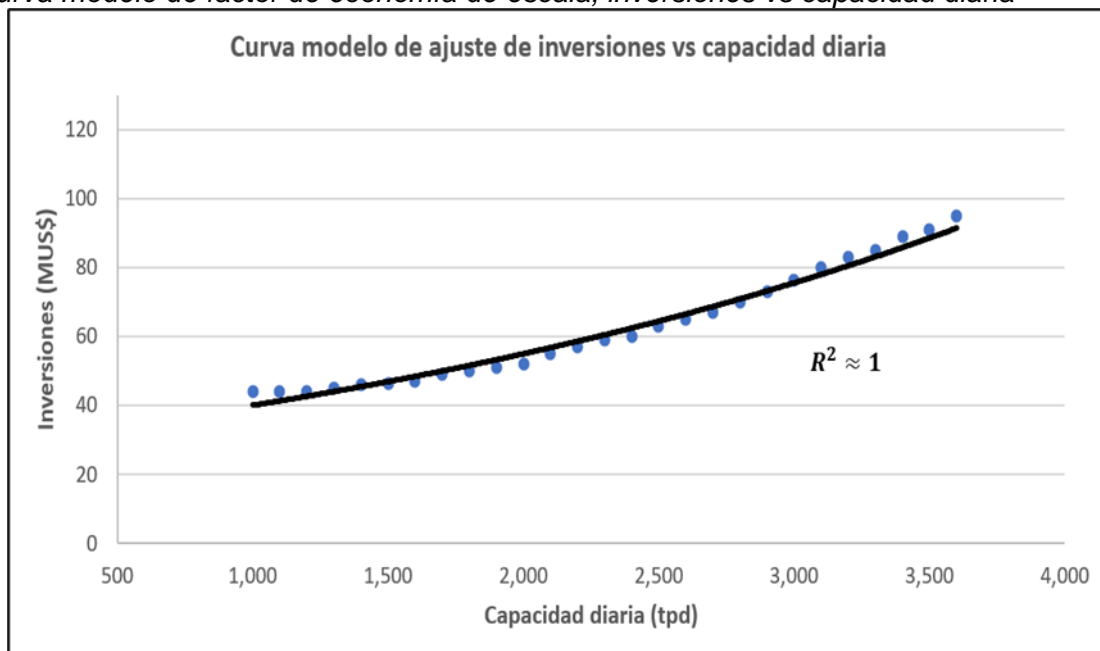
Aquí, el factor crítico en este método es el valor de "x", que varía típicamente entre 0.4 y 1. Su determinación se basa generalmente en la recopilación de datos sobre inversiones y capacidades de proyectos mineros y mineralúrgicos similares, seguida de un tratamiento estadístico. Por otro lado, la constante "Capacidad" en esta curva de economía de escala se refiere al ritmo de producción, expresado en toneladas por día, y guarda relación directa con el costo de capital de inversión: al aumentar el ritmo de producción, es esperable un incremento en dicho costo.

Poulin R. et al (1998), Capital and Operating Cost Estimating System Handbook, indican que este tipo de curvas se ajustan mejor mediante funciones exponenciales que lineales, como se ejemplifica en la Figura 14 para la capacidad de producción diaria. Esto se debe a que las relaciones entre costos y capacidad en proyectos mineros presentan una elasticidad no constante, mejor capturada por expresiones exponenciales.

La robustez de estas curvas depende significativamente de la cantidad y calidad de los datos de utilizados para su construcción. En particular, se busca que el coeficiente de determinación “R2” del modelo ajustado sea cercano a uno, lo cual indica una alta capacidad explicativa del modelo respecto a la variabilidad observada en los costos. Esto permite que las curvas de economía de escala se conviertan en una herramienta útil y robusta para la estimación preliminar de costos en etapas de estudio de proyectos mineros.

Figura 14

Curva modelo de factor de economía de escala, inversiones vs capacidad diaria



Fuente: Cost Estimation in Project Planning, Williams T. (1992)

2.1.20 Valor actual neto (VAN)

Brealey R. et al (2011), Principles of Corporate Finance, destacan que cualquier proyecto o negocio minero debe evaluarse mediante indicadores de rentabilidad, siendo el Valor Actual Neto (VAN) uno de los más aceptados, cuyo valor describe las ganancias o pérdidas económicas presentes con lo que la empresa puede decidir si procede o no con la inversión del proyecto.

El VAN es un procedimiento que nos permite el cálculo del valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros durante los años que dura el proyecto. El método, además descuenta los flujos en base a una tasa de inversión o tasa de descuento, la cual tiene un mismo valor para todos los periodos considerados.

De acuerdo con lo anterior, la fórmula que nos permite calcular el VAN se expresa mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

VAN = Valor Actual Neto (US\$)

r = Tasa de descuento (%)

I = Inversión Inicial (Costo de capital)

B_i = Beneficio en el año *i*

i = Año *i*, desde 1, 2, ..., *L*

L = Vida de la mina medido en años (LOM)

El valor de este instrumento financiero denominado Valor Actual Neto, nos indicará si se acepta la inversión en el proyecto o es rechazada, como se puede ver a continuación:

Tabla 3

Resumen de decisiones basadas en el valor de VAN

VALOR	SIGNIFICADO	DECISIÓN
VAN > 0	La inversión producirá ganancias.	El proyecto puede aceptarse.
VAN < 0	La inversión producirá pérdidas.	El proyecto debería rechazarse.
VAN = 0	La inversión no producirá, ni ganancias ni pérdidas.	La decisión debería basarse en otros criterios.

Fuente: Principles of Corporate Finance, Brealey R. (2011)

2.1.21 Índice de valor actual neto (IVAN)

Gentry D. et al (1984), Mine Investment Analysis, introducen el concepto de IVAN, el cual es una variación del índice de rentabilidad que mide el valor presente neto del proyecto por unidad de inversión: la fórmula que nos permite calcular el IVAN será:

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

Donde:

VAN = Valor Actual Neto (US\$)

I = Inversión Inicial (Costo de capital)

Si se utiliza correctamente el IVAN, es equivalente a utilizar el VAN, por lo que también se puede deducir que se aceptara la ejecución de un proyecto para valores $IVAN > 0$.

2.1.22 Tasa interna de retorno (TIR)

Damodaran A. (2002), Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset, plantea que la TIR es un indicador de rentabilidades de proyectos o inversiones, de manera que cuanto mayor sea la TIR mayor será la rentabilidad. Realizando el cálculo de la TIR de diferentes proyectos se facilita la toma de decisiones sobre la inversión.

La TIR es la tasa de descuento con la que el VAN se iguala a cero, o, dicho de otra manera, la tasa que iguala la suma del valor actual de los gastos con la suma del valor actual de los ingresos previstos.

De acuerdo con lo anterior, la fórmula que nos permite calcular la TIR será:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^L \frac{B_i}{(1+r)^i} = 0$$

Donde:

VAN = Valor Actual Neto (US\$)

r = Costo de oportunidad o tasa de descuento (%)

I = Inversión Inicial (Costo de capital)

B_i = Beneficio en el año *i*

i = Año *i*, desde 1, 2, ..., *L*

L = Vida de la mina medido en años (LOM)

El valor de este instrumento financiero denominado TIR, nos indicará también si se acepta la inversión en el proyecto o es rechazada, como se puede ver a continuación:

Tabla 4*Resumen de decisiones basadas en el valor de TIR*

VALOR	SIGNIFICADO	DECISIÓN
$TIR > r$	La rentabilidad supera la tasa de descuento o costo de capital.	El proyecto puede aceptarse.
$TIR < r$	La rentabilidad no cubriría la tasa de descuento o costo de capital.	El proyecto debería rechazarse.
$TIR = r$	La inversión no producirá, ni ganancias ni pérdidas.	La decisión debería basarse en otros criterios.

Fuente: Tools and techniques for determining the value of any asset, Damodaran A. (2002)

2.1.23 Evaluación de proyectos con riesgo e incertidumbre

Sullivan W. (1980), *Engineering economy*, indica que en los análisis económicos suele asumirse que los valores de todas las variables involucradas se conocen con certeza. Bajo este enfoque determinístico, los factores de riesgo e incertidumbre son usualmente excluidos del estudio formal y, en el mejor de los casos, se consideran de forma subjetiva a partir del juicio del evaluador, apoyado en su experiencia o criterio profesional. No obstante, en la práctica, esta suposición no se ajusta a la realidad de proyectos mineros, donde la incertidumbre es inherente debido a la variabilidad geológica, fluctuaciones del mercado, aspectos operativos, entre otros factores. Por tanto, omitir dicha incertidumbre puede conducir a conclusiones poco robustas o subestimaciones significativas del riesgo.

Para abordar esta problemática, Clemen R. et al (1997), *Making hard decision with decision tools*, proponen el uso del análisis probabilístico, también denominado análisis estocástico. Este enfoque permite cuantificar los riesgos y modelar la incertidumbre de manera estructurada, brindando así una base más sólida para la toma de decisiones bajo escenarios no determinísticos, sin eliminar la participación del juicio experto, pero complementándolo con herramientas cuantitativas.

Una de las técnicas ampliamente utilizadas para incorporar el riesgo en la evaluación económica de proyectos es la simulación de Montecarlo. Este enfoque aplica una técnica de simulación numérica que, si bien es conceptualmente sencilla y de fácil comprensión y aplicación, requiere una elevada cantidad de cálculos iterativos y el uso de conceptos estadísticos fundamentales. Su aplicación permite modelar de forma realista la

variabilidad de los parámetros críticos del proyecto y estimar la distribución probabilística de los resultados económicos.

2.1.24 Variables aleatorias

Winston W. (2004), *Operations research: Applications and algorithms*, señala que para implementar la simulación de Montecarlo es necesario caracterizar adecuadamente los parámetros inciertos mediante variables aleatorias. En el análisis económico de proyectos, numerosas magnitudes clave presentan una naturaleza incierta, lo que impide asignarles un valor único con certeza. No obstante, es posible caracterizar su comportamiento mediante funciones de probabilidad, que permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes valores dentro de un rango definido. Estas magnitudes modeladas formalmente como variables aleatorias posibilitan la incorporación de la incertidumbre en evaluaciones cuantitativas, facilitando así un análisis estocástico del proyecto.

Así, por ejemplo, magnitudes como las reservas minables, las inversiones de capital o los costos operativos pueden representarse mediante una variable aleatoria X , la cual define un conjunto de valores posibles, cada uno asociado a una probabilidad de ocurrencia determinada. Esta representación permite modelar de manera rigurosa la incertidumbre inherente a estos parámetros clave del proyecto.

Ross S. (2014), *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist*, establece que las variables aleatorias se clasifican en discretas y continuas. Una variable aleatoria es discreta cuando sus valores posibles forman un conjunto numerable, mientras que es continua si puede tomar cualquier valor real dentro de un intervalo dado. Una variable discreta se describe mediante su función de probabilidad o histograma, donde cada valor posible X_i , tiene una probabilidad asociada $P_x(x_i)$. Es fundamental que se cumpla la siguiente condición:

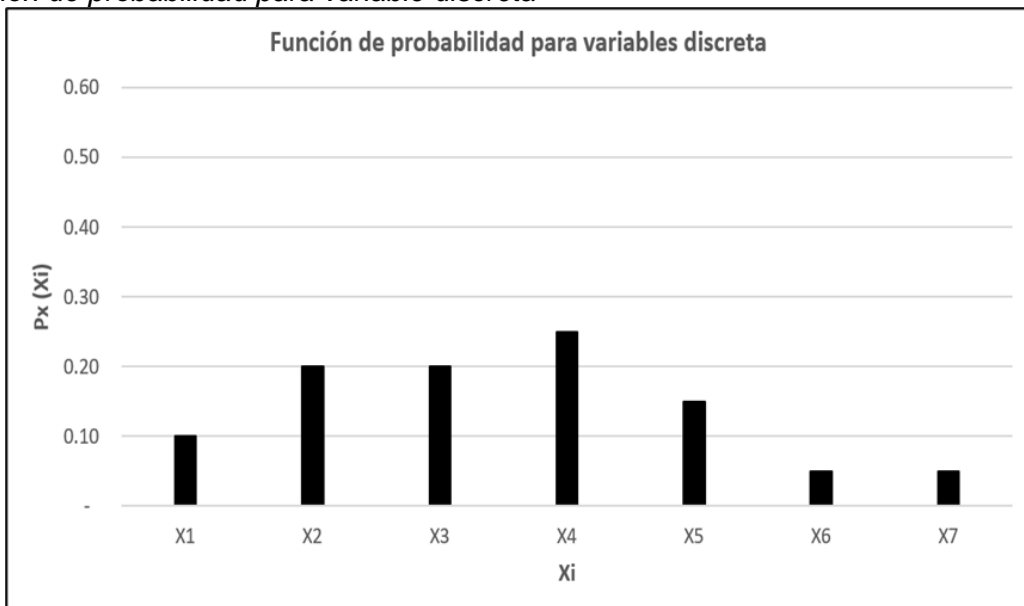
$$\sum_{\forall i} P_x(x_i) = 1$$

Esto asegura que la suma de las probabilidades de todos los posibles valores de X es igual a uno, reflejando la certeza de que X tomará alguno de esos valores. La variable aleatoria discreta también se caracteriza mediante su función de distribución $F_X(x)$, que se define como la probabilidad de que X tome un valor menor o igual a x:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \sum_{\forall X_i \leq x} p_x(X_i)$$

Figura 15

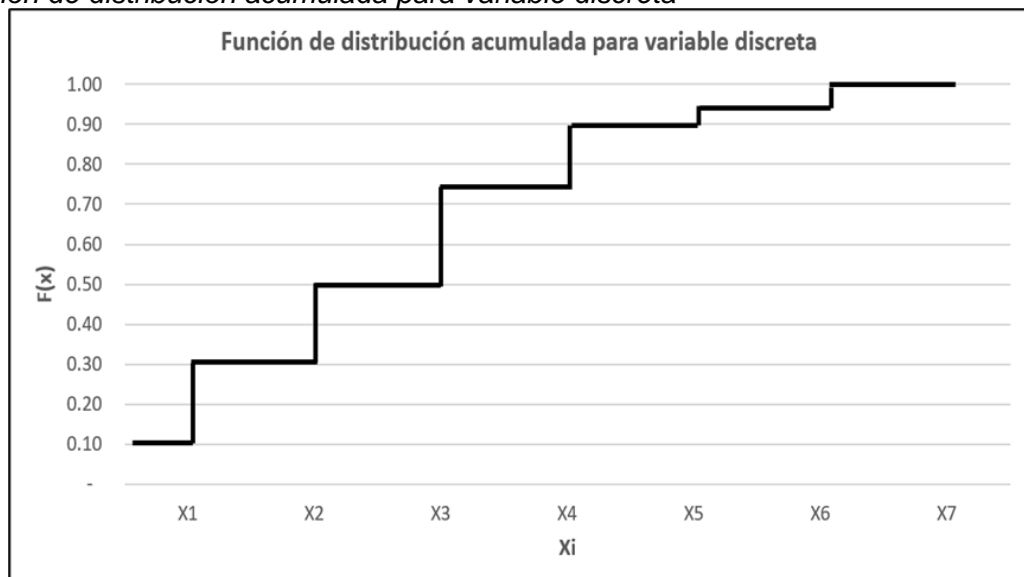
Función de probabilidad para variable discreta



Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

Figura 16

Función de distribución acumulada para variable discreta

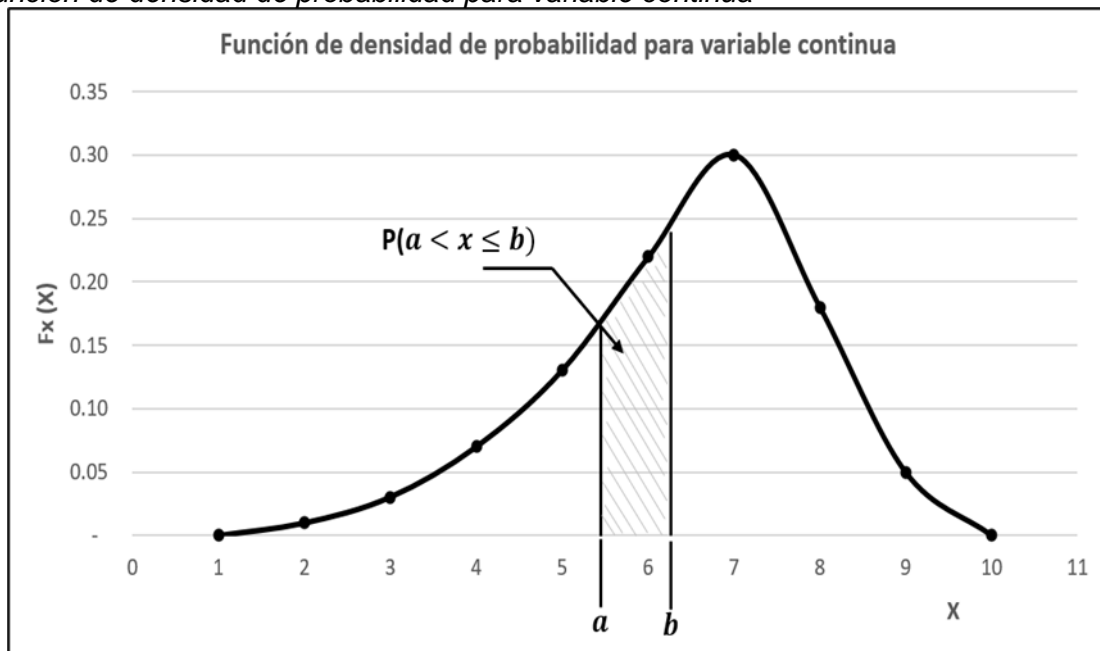


Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

función de distribución. A partir de estas representaciones se pueden calcular ciertos valores característicos, o descriptores que, aunque no determinan completamente la variable aleatoria, proporcionan información clave sobre sus propiedades fundamentales. Entre los descriptores más importantes se encuentra la media o valor esperado, desviación estándar, moda y mediana.

Figura 18

Función de densidad de probabilidad para variable continua



Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

Asimismo, el valor esperado de una variable aleatoria, también conocida como media, es la media ponderada de todos los valores posibles, considerando la probabilidad de ocurrencia de cada uno. Este valor representa la tendencia central de la variable. Para una variable aleatoria discreta, el valor esperado se calcula como:

$$E(X) = \sum_{\forall i} x_i * p_x(x_i)$$

Para una variable aleatoria continua, la expresión anterior se reemplaza por:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx$$

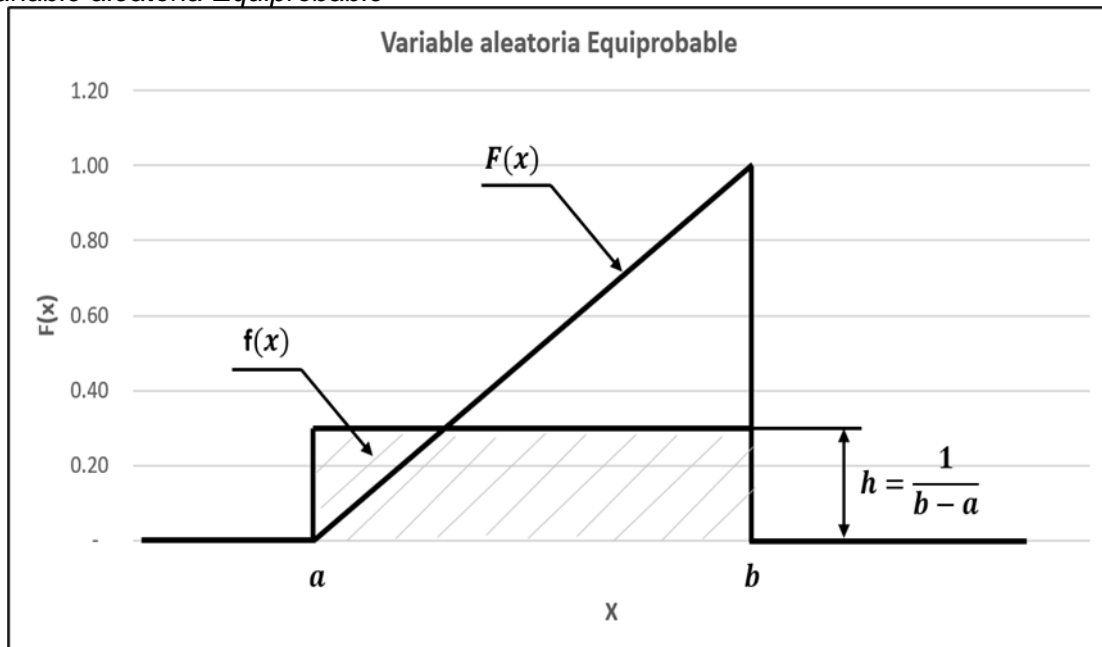
A continuación, se describen brevemente los tipos de variables aleatorias que se manejan más frecuentemente en análisis de riesgos:

2.1.24.1 Variable aleatoria equiprobable. Walpole R. et al (2012), Probability and Statistics for Engineers and Scientist, señala que, para una variable aleatoria equiprobable, su función de densidad de probabilidad es constante en un cierto intervalo (a; b) y nula fuera de él. Para describir completamente esta distribución basta con conocer los valores “a” y “b”. En ese caso, la densidad de probabilidad en el intervalo (a; b) resulta ser igual a $1/(b-a)$, es decir:

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} ; \text{para } a \leq x \leq b$$

Figura 19

Variable aleatoria Equiprobable

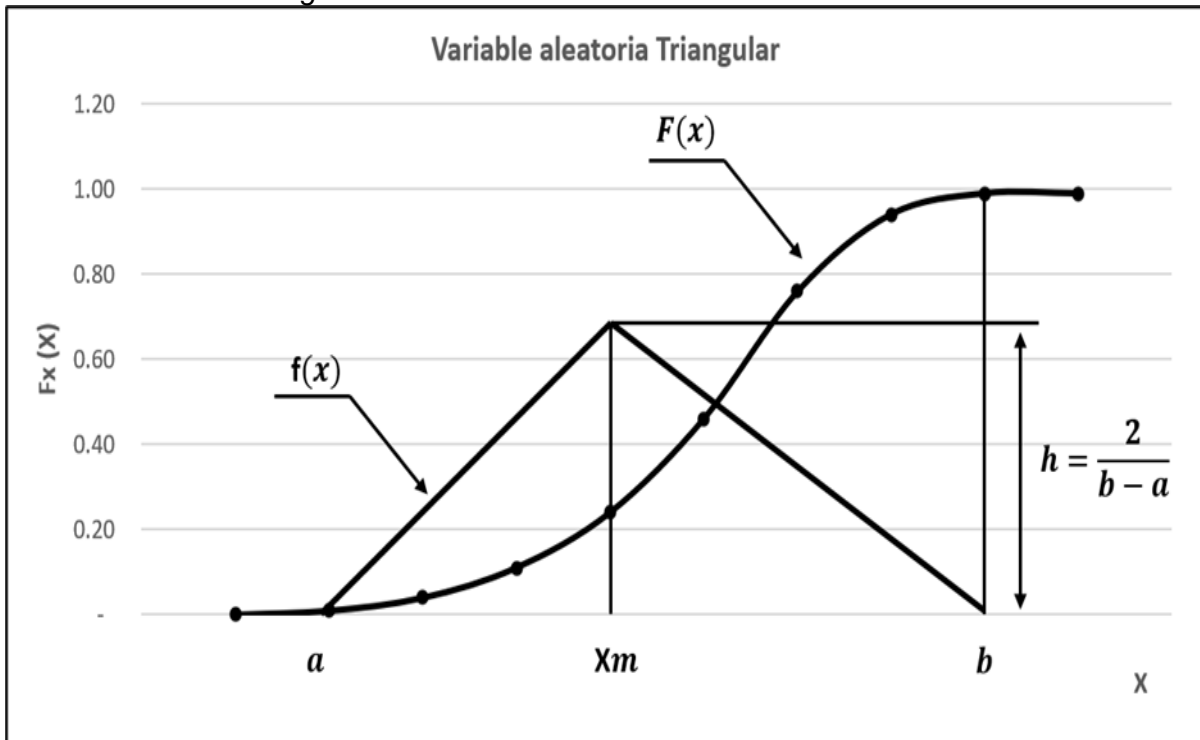


Fuente: Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Walpole R. (2012)

2.1.24.2 Variable aleatoria triangular. Thomopoulos N. (2017), Statistical Distributions, indica que la función distribución triangular se caracteriza por una función de densidad con forma de triángulo en el intervalo (a; b), cuyo vértice se encuentra en el punto de la abscisa “x_M”. La función es nula fuera del intervalo citado. La función de densidad queda completamente determinada por los tres valores “a”, “b” y “x_M”, como resultado de estos valores la probabilidad debe ser igual $2/(b-a)$. La función de distribución está compuesta por dos arcos de parábola de eje vertical, tangentes en el punto de abscisa “x_M”, generando un punto de inflexión.

Figura 20

Variable aleatoria triangular



Fuente: Statistical Distributions, Thomopoulos N. (2017)

2.1.24.3 Variable aleatoria normal. Ross S. (2014), Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist, establece que la distribución normal o de Gauss es una de las más conocidas y utilizadas en el análisis probabilísticos de proyectos de ingeniería, debido a su aplicabilidad en fenómenos naturales y económicos.

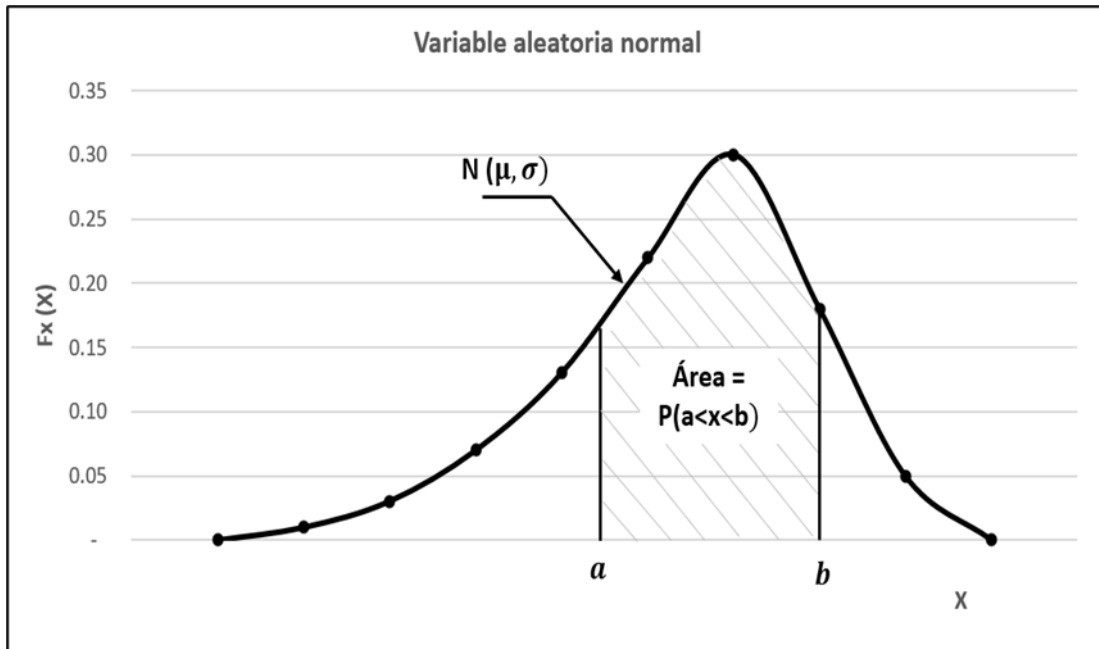
La función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria Normal está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

En donde los parámetros " μ " y " σ ", que la determinan por completo, son precisamente la media y la desviación típica de la variable analizada. La variable aleatoria normal de parámetros " μ " y " σ ", se representa simbólicamente por $N(\mu, \sigma)$. Tiene la forma de campana típica simétrica respecto de $x=\mu$, tal como se representa en la Figura 21.

Figura 21

Variable aleatoria Normal



Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

2.1.24.4 Variable aleatoria lognormal. Ross S. (2014), Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist, señala que una variable aleatoria sigue una distribución Lognormal si el logaritmo neperiano de dicha variable se distribuye normalmente. Dada una variable aleatoria normal Y de media “λ” y desviación típica “C”, la variable $X = \exp(Y)$ será lognormal.

En consecuencia, se tiene:

$$\lambda = E(Y) = E(\ln X) \quad \wedge \quad C = V(Y) = V(\ln X)$$

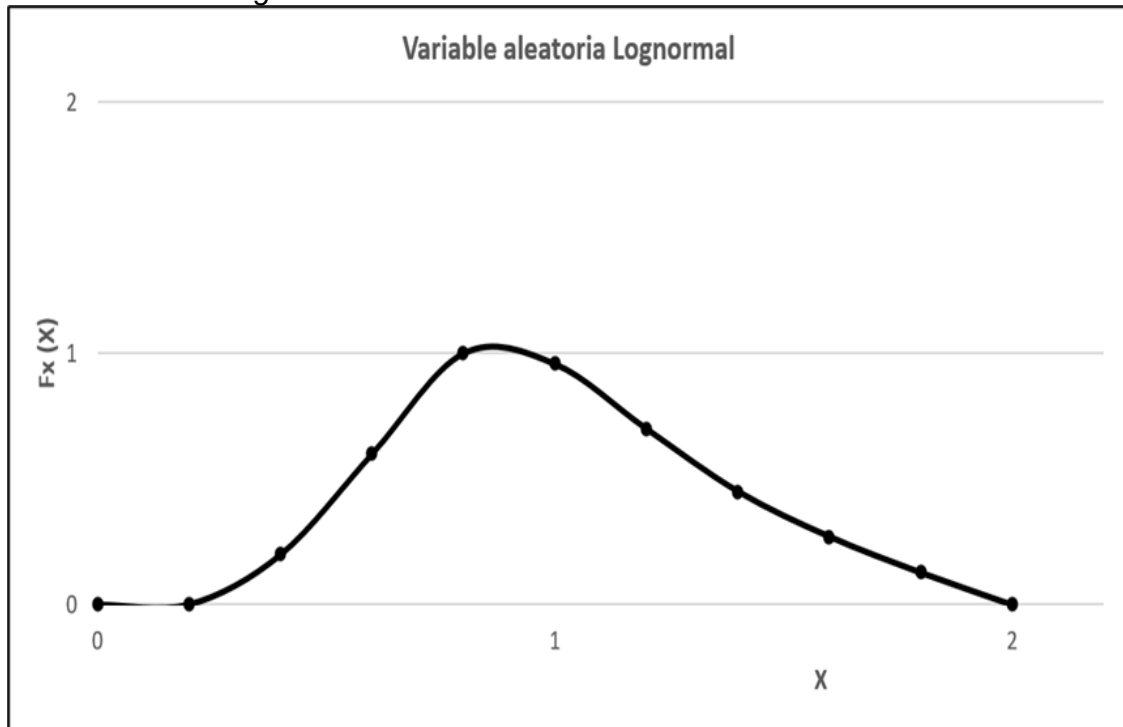
$$f_{(y)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}C} \exp \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \lambda}{C}\right)^2\right] \quad (-\infty < x < +\infty)$$

La función de densidad de probabilidad $f_{(x)}$ buscada será:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Cx} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{C}\right)^2\right] \quad (0 < x < +\infty)$$

Figura 22

Variable aleatoria Lognormal



Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

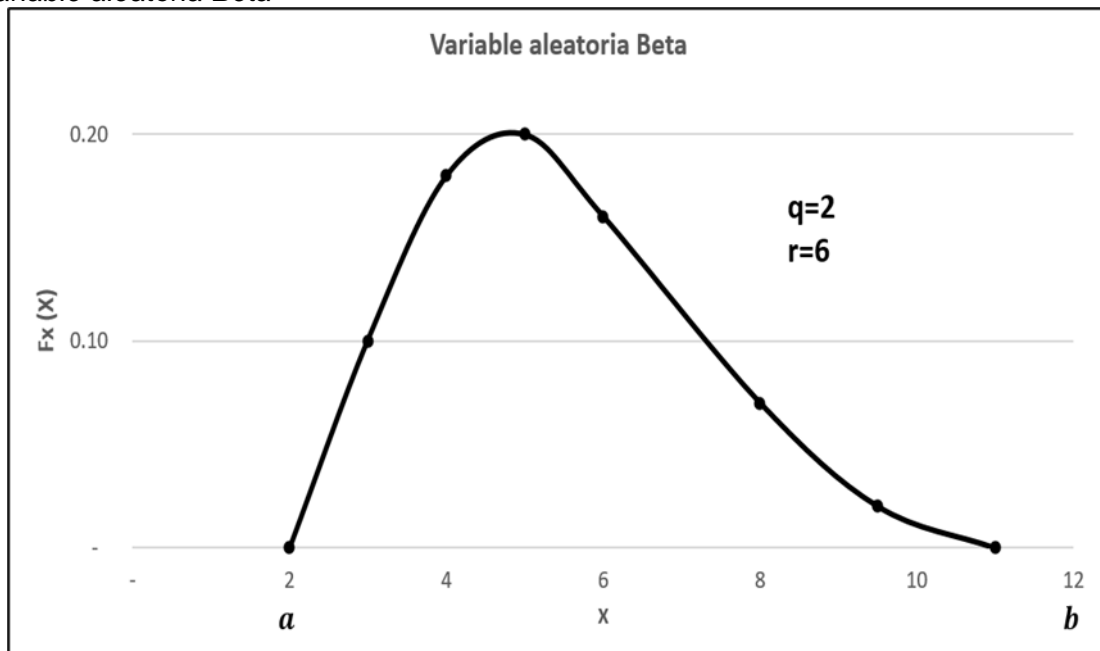
2.1.24.5 Variable aleatoria beta. Ross S. (2014), Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist, indica que la distribución beta, al igual que la distribución triangular, está definida únicamente en un intervalo acotado (**a**; **b**). Esta distribución es particularmente útil cuando se desea modelar fenómenos cuya variable aleatoria está restringida a un rango específico, como proporciones, porcentajes o tasas. La función de densidad de probabilidad está definida por:

$$f_{(x)} = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}}$$

En donde "**q**" y "**r**" son dos parámetros que determinan su forma y **B (q,r)** es la función beta. La forma de la distribución varía con los parámetros "**q**" y "**r**". En la Figura 23 se muestra una curva tanto asimétrica cuanto más diferente sean "**q**" y "**r**".

Figura 23

Variable aleatoria Beta



Fuente: Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Ross S. (2014)

2.1.24.6 Dependencia de variables aleatorias. Ross S. (2014), Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist, explica que las diversas variables aleatorias que intervienen en el análisis de riesgo de un proyecto pueden o no tener correlación entre ellas, por lo tanto, la dependencia entre dos variables aleatorias X e Y se puede clasificar en tres niveles:

- Nula: Las variables X e Y son mutuamente independientes.
- Total: Existe una relación funcional $[Y=f](x)$ entre variables.
- Parcial: Hay una correlación estadística más o menos marcada entre X e Y.

2.1.25 Método de simulación Montecarlo

Hertz D. (1964), Risk analysis in capital investment, introduce el método de simulación Montecarlo en el análisis de decisiones en contexto de alta incertidumbre, marcando un hito en la evaluación de proyectos de inversión con parámetros sujetos a variabilidad. Esta metodología permite capturar el comportamiento probabilístico de las variables críticas, proporcionando una base más realista para la toma de decisiones bajo riesgo.

Vose D. (2008), *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, amplia este enfoque al destacar que los flujos anuales generados por un proyecto de inversión están condicionados, en gran medida, por los distintos estados de la naturaleza que puedan presentarse. La base para el análisis económico requiere estructurar adecuadamente los estados y asignarles probabilidades para determinar los flujos anuales esperados. En este contexto, el criterio más empleado es el Valor Actual Neto (VAN), que en este caso se denomina VAN esperado. Este valor puede interpretarse como el promedio del VAN que resultaría si se ejecutaran múltiples proyectos idénticos bajo las mismas condiciones.

A pesar de que un proyecto pueda mostrar un VAN esperado significativamente positivo, esto no implica necesariamente que esté exento de riesgos; por ello, además del valor esperado, es crucial evaluar el riesgo asociado. La condición de un VAN esperado positivo es necesaria, pero no suficiente para garantizar la viabilidad del proyecto.

La incertidumbre inherente a muchos de los factores que determinan el valor económico de un proyecto puede cuantificarse eficazmente mediante la representación de estos factores como variables aleatorias. Por lo tanto, el objetivo principal del análisis de riesgo es modelar y evaluar estos factores inciertos para obtener una representación precisa de los resultados posibles. Para llevar a cabo este análisis, se requiere emplear un enfoque que no solo capture la variabilidad de las variables claves, sino también que refleje la complejidad de sus interacciones.

En este contexto, el método de Montecarlo ofrece una herramienta flexible frente a las limitaciones del enfoque analítico y determinístico. Mediante muestreo simulado, permite generar distribuciones de resultados a partir de las funciones de las variables aleatorias, con múltiples ventajas, entre ellas:

- Proporciona un completo panorama económico, complementándose con un análisis detallado de riesgo.
- Es capaz de manejar datos empíricos sin necesidad de formulaciones analíticas complejas.
- Su conceptualización es sencilla e intuitiva.

Para llevar a cabo el análisis de riesgo, se requieren esencialmente los siguientes componentes:

- Un modelo económico que determine el indicador de rentabilidad deseado en función de los datos disponibles, tanto aquellos conocidos con certeza como aquellos afectados por incertidumbre.
- Las funciones de distribución de todos los datos sujetos a incertidumbre son representadas como variables aleatorias, que reflejen además las posibles interdependencias y correlaciones.

En las simulaciones de Montecarlo, el proceso consiste en cuatro operaciones básicas:

- Generar aleatoriamente un valor para cada variable aleatoria, de acuerdo con su función de distribución, realizando así un muestreo simulado.
- Se introduce en el modelo económico el conjunto de valores generados, se determina el indicador de rentabilidad X y se registra el resultado.
- Se repiten los pasos a) y b) hasta ejecutar el número de simulaciones deseados.
- Se clasifican por intervalos los valores del indicador de rentabilidad X obtenidos en las sucesivas simulaciones, y se calculan, tabulan y representan gráficamente las frecuencias relativas y las probabilidades acumuladas.

Una vez ejecutadas las simulaciones de Montecarlo, el conjunto de resultados obtenidos para el indicador económico X se puede representarse mediante su función de densidad de probabilidad $F_x(x)$, la cual permite visualizar la distribución de los posibles resultados del proyecto. A partir de esta representación, y como parte integral del análisis de riesgo, se construye el denominado perfil de riesgo $R_x(x)$, el cual expresa la probabilidad de que el indicador X supere un umbral específico. Matemáticamente, se define como:

$$R_x(x) = P(X > x)$$

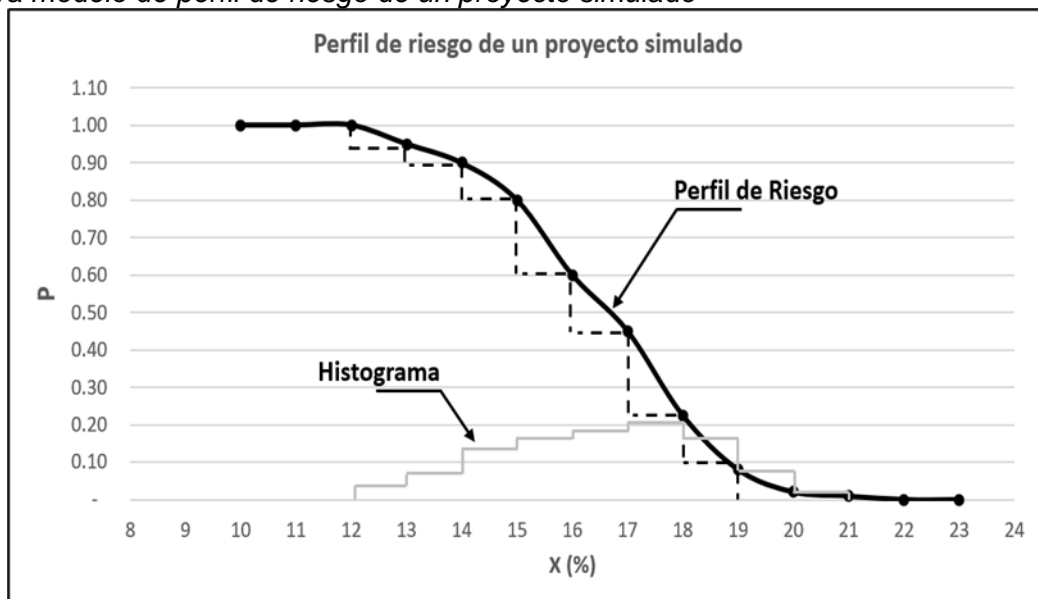
Lo cual equivale a:

$$R_x(x) = P(X > x) = 1 - P(X \leq x) = 1 - F_x(x)$$

Este perfil se deriva directamente de la función de distribución acumulada del indicador simulado y permite evaluar la probabilidad de obtener resultados superiores a un valor crítica establecido. El perfil de riesgo se relaciona, por tanto, con la función de distribución de la variable dependiente o de salida. En la práctica, este enfoque suele aplicarse a indicadores como la Tasa Interna de Retorno (TIR) expresada en porcentaje, proporcionando así una visión más robusta del riesgo asociado al proyecto.

Figura 24

Curva modelo de perfil de riesgo de un proyecto simulado



Fuente: Risk Analysis: A Quantitative Guide, Vose D. (2008)

2.2 Marco conceptual

En esta sección se presentan definiciones clave para comprender los conceptos técnicos utilizados a lo largo de la presente investigación. Dado que algunos conceptos tienen un significado específico en el contexto minero, por lo que se precisan a continuación para evitar interpretaciones erróneas y facilitar su correcta interpretación.

2.2.1 Tajeo

En minería subterránea, un tajeo es una unidad delimitada de explotación mineral. Se trata de una zona específica del yacimiento que se prepara para ser extraída, respetando dimensiones técnicas y condiciones de estabilidad.

2.2.2 Ley

En minería, la ley es una medida que expresa la concentración del mineral valioso dentro del material extraído. Se suele expresar en gramos por tonelada (g/t), onzas por tonelada (oz/t) o en porcentaje (%). Por ejemplo, una ley de 5.00 g/t de oro indica que, en promedio, cada tonelada de roca contiene 5.00 gramos de oro.

2.2.3 Producción

Es la cantidad de mineral que se extrae durante un periodo determinado (por día, mes o año). Al planificarla, se deben considerar factores como la capacidad operativa de la mina, los costos asociados, la recuperación metalúrgica y el impacto económico sobre la rentabilidad del proyecto.

2.2.4 Secuencia

En el contexto minero, la secuencia hace referencia al orden planificado en que se extraen las distintas zonas de un yacimiento. Una secuencia adecuada permite acceder al mineral de mayor valor en los momentos estratégicos, optimizando los flujos de caja y la eficiencia del proyecto.

2.2.5 Valor de mineral

En minería, el valor se refiere al beneficio económico que puede generar el mineral contenido en el yacimiento. Este valor depende de la ley del mineral, la recuperación metalúrgica, el precio de venta y los costos asociados a su extracción y procesamiento.

2.2.6 Escenario

Un escenario es una combinación específica de decisiones técnicas y económicas que define como podría desarrollarse un proyecto. Evaluar múltiples escenarios permite comparar resultados y seleccionar la estrategia que maximiza el valor del mineral extraído.

2.2.7 Simulación

Es una herramienta que permite modelar el comportamiento futuro del proyecto bajo distintos escenarios. En minería, la simulación incorpora incertidumbre en variables como precios, leyes y costos para evaluar el riesgo económico.

2.2.8 Optimización

Es el proceso de encontrar la mejor combinación posible de decisiones técnicas y económicas para maximizar un objetivo, como el valor del proyecto. En minería, la optimización considera variables como producción, secuencia, ley de mineral, inversión y recuperación.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección y procesamiento de datos

3.1.1 Descripción del proyecto

El proyecto evaluado en la presente tesis corresponde a una mina subterránea de oro, actualmente en etapa de prefactibilidad, que empleara el método de explotación por Tajeo de Taladros Largos en su variante longitudinal, conocida como Bench and Fill (B&F). Este método fue seleccionado durante la etapa de ingeniería conceptual mediante una matriz de selección técnico-económica, sustentada en un análisis cualitativo-cuantitativo. La elección se fundamenta principalmente en las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y en la geometría del cuerpo mineralizado, factores que permiten una extracción eficiente y segura bajo este método.

El diseño mina contempla la construcción de una rampa principal de acceso, así como otras infraestructuras clave: bypasses, galerías, cruceros, cámaras de carguío, echaderos de mineral y chimeneas de ventilación. El ciclo de minado considera las operaciones unitarias de perforación, voladura, limpieza de mineral y el posterior relleno de los espacios vacíos, bajo una configuración que permite alturas de tajeo de producción de hasta 16 metros, asegurando la estabilidad estructural y la eficiencia operativa.

En cuanto a la selección de cut off, el estudio de prefactibilidad aplicó la metodología del breakeven cut off para definir los límites económicos de la operación. El cut off económico determinado fue de 115.26 US\$/t, el cual incluye los costos de explotación, procesamiento, servicios y administrativos. Este valor ha servido como base para el diseño del plan de minado y validación económica preliminar del proyecto.

Desde el punto de vista económico, la evaluación del proyecto minero considera una vida útil de 7.8 años, con un ritmo de producción de 1,600 toneladas por día (valor determinado en el estudio de prefactibilidad mediante la fórmula de Taylor). El proyecto en esta de ingeniería proyecta un VAN de 24.47M US\$ con indicadores económicos de IVAN de 0.14 y una TIR del 13.07%, aplicando una tasa de descuento del 10%. Aunque

los resultados son positivos, reflejan un nivel de atractivo relativamente bajo para los inversionistas, dada las exigencias de rentabilidad y riesgo típicos en la industria minera.

Este proyecto ha sido seleccionado como caso de estudio para la presente investigación debido a su representatividad técnica y económica, así como por contar con información suficiente y estructurada que permite implementar y contrastar de manera rigurosa el enfoque tradicional del Hill of Value con su versión mejorada, La información detallada en los apartados siguientes servirá como base para desarrollar los modelos comparativos propuestos.

3.1.2 Datos recolectados del proyecto

El levantamiento de información se constituye como pilar fundamental para la validación de la metodología propuesta. En esta fase, se ha recopilado una amplia gama de datos tanto cualitativos como cuantitativos, que incluyen características geológicas, propiedades de los materiales y parámetros operativos. La información obtenida se ha organizado de manera sistemática para garantizar su relevancia y aplicabilidad en el diseño metodológico.

Esta etapa no solo permite contextualizar el entorno operativo del proyecto minero, sino que también facilita la identificación de variables críticas que influirán en la toma de decisiones. La calidad y nivel de los datos obtenidos aseguran que las simulaciones y los análisis posteriores reflejen fielmente la realidad del proyecto minero, y a su vez garantice la robustez de las conclusiones y recomendaciones derivadas de la presente tesis.

3.1.2.1 Modelo de bloques del proyecto. Con la información obtenida mediante 100 sondajes diamantinos, el área de geología realizó y entregó un modelo de bloques de recursos, este modelo de bloques representa un yacimiento tabular con mineralización de Au y Ag que, por sus características espaciales, dimensiones y profundidad, hacen que el método de explotación de Taladros Largos en su variante Bench and Fill sea el método de explotación que más se ajusta al yacimiento.

La Tabla 5 presenta las características geométricas del modelo de bloques utilizado en la evaluación del yacimiento. Los valores incluyen coordenadas mínimas y máximas

para cada eje (X, Y, Z), que delimitan el área del modelo. Por temas de confidencialidad, se ha considerado modificar las coordenadas de origen del yacimiento. La extensión del modelo abarca una longitud de 702m en el eje X (Este), 234,408m en el eje Y (Norte) y 1,353 metros en el eje Z (Elevación). Cada bloque tiene dimensiones de 3.00m en los ejes X e Y, y 1.50m en el eje Z, resultando en un total de 79,272 bloques en el modelo.

Tabla 5

Geometría del modelo de bloques

ITEM	X (ESTE)	Y (NORTE)	Z (ELEVACIÓN)	TOTAL
Coordenada mínima	187,839	8,053,344	3,621	---
Extensión del modelo	702	234,408	1,353	---
Coordenada máxima	188,541	8,287,752	4,974	---
Tamaño bloque (m)	3.00	3.00	1.50	---
Numero de bloques	234	78,136	902	79,272

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7, se detalla el Inventario de recursos minerales y las leyes promedio de oro (Au) y plata (Ag) según el modelo de bloques. Se estima un total de 10,936,536 toneladas, con una ley media de 2.47 g/t de Au y 3.09 Oz/t de Ag. Las categorías de recursos se desglosan en Recursos Medidos con 5,058,512 toneladas a una ley de 4.07 g/t de Au y 4.83 Oz/t de Ag y Recursos Indicados con 5,878,024 toneladas a 1.09 g/t de Au y 1.58 Oz/t de Ag.

Tabla 6

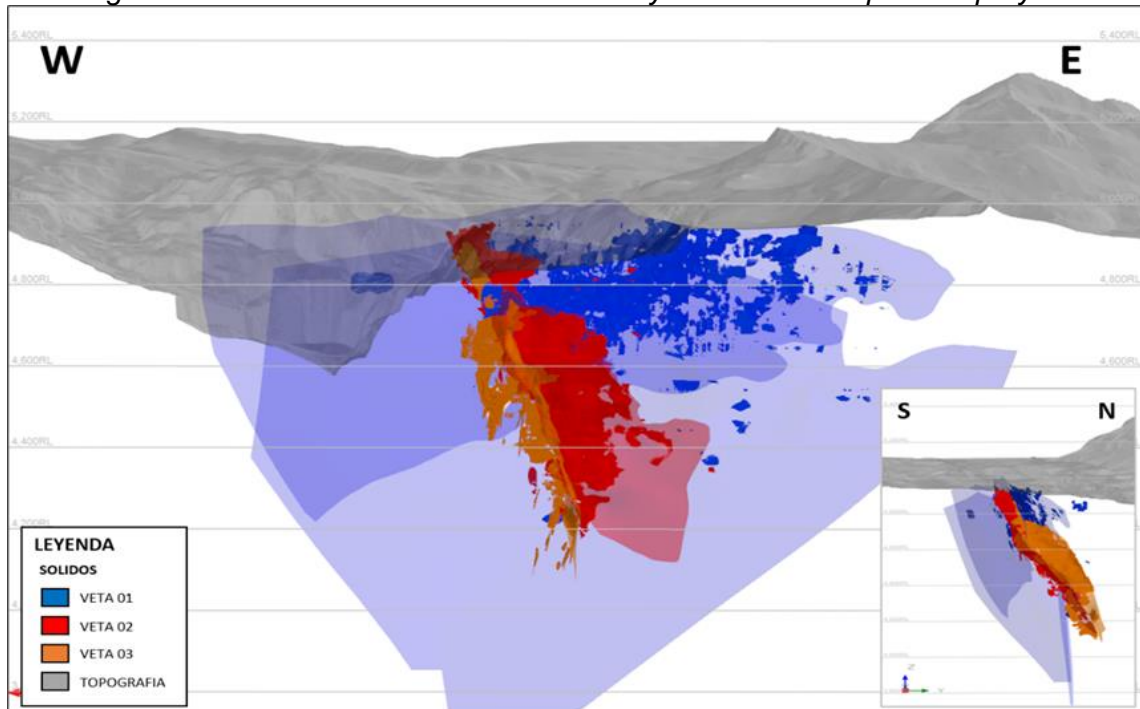
Inventario de recurso mineral y leyes de Au y Ag según modelo de bloques

CATEGORÍA	TONELADAS (t)	AU (g/t)	AG (oz/t)
Recurso Medido	5,058,512	4.07	4.83
Recurso Indicado	5,878,024	1.09	1.58
Recurso Total	10,936,536	2.47	3.09

Fuente: Elaboración propia

Figura 25

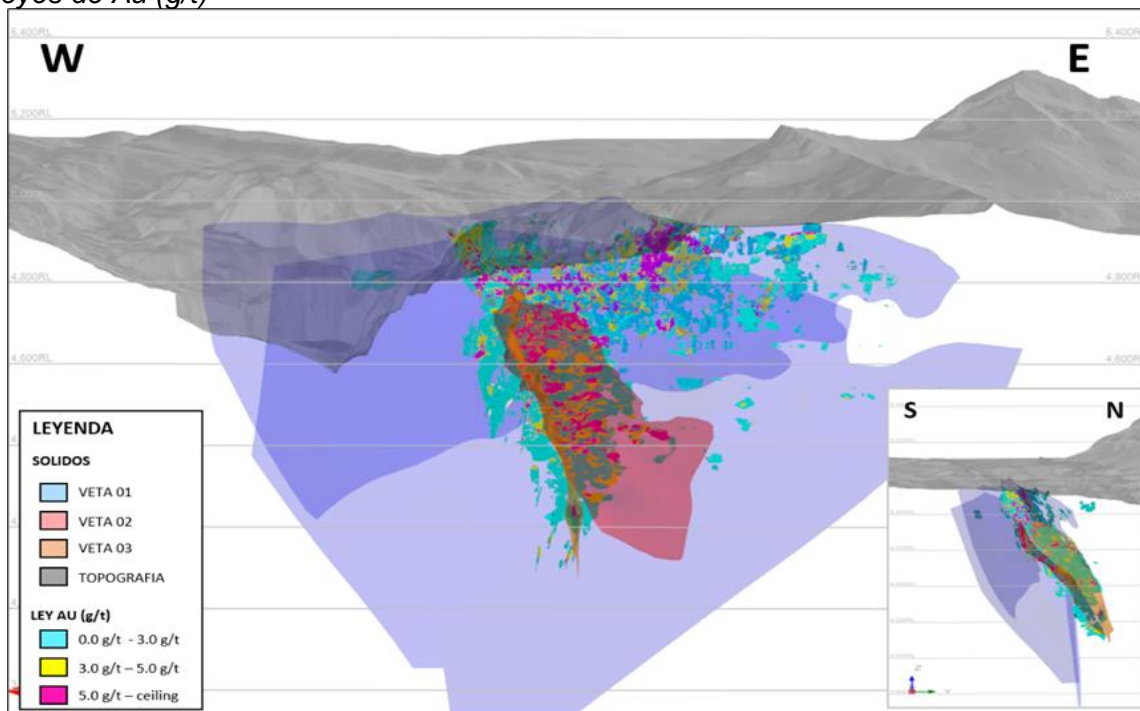
Vista longitudinal de los sólidos de las estructuras y modelo de bloques del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Vista longitudinal de los sólidos de las estructuras y modelo de bloques del proyecto con leyes de Au (g/t)



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 Factores modificadores operativos.

3.1.2.2.1 Precio de metales y términos comerciales. Los precios y términos comerciales están basados en el estudio de mercado realizado por una consultora especializada que contrato la compañía minera y por las expectativas corporativas de este proyecto subterráneo a largo plazo.

Tabla 7

Precios y términos de venta de los metales

PARÁMETROS	CANTIDAD	UNIDAD
Precio Au	1,600.00	US\$/Oz
Precio Ag	25.00	US\$/Oz
Au Pagable	99.95	%
Ag Pagable	99.90	%
Costo venta Doré	6.92	US\$/Oz

Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

3.1.2.2.2 Valor punto. El valor punto se obtiene a partir de la relación entre la diferencia entre el precio del metal y el costo de venta de la barra Doré y el porcentaje pagable del metal. Representa el valor del metal por unidad representativa del mismo. Las fórmulas para calcular el valor punto para este proyecto son:

$$VP_{Au} = \frac{(\text{Precio}_{Au} - \text{Costo Venta}_{Au})}{31.10348} * Au_{pagable}$$

$$VP_{Ag} = \text{Precio}_{Ag} * Ag_{pagable}$$

Reemplazando los datos en las ecuaciones mencionadas, se obtienen los valores puntos que se utilizaran para este proyecto, los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 8

Valores punto

METAL	VALOR PUNTO	UNIDAD
Au	51.193	US\$/(g/t)
Ag	24.975	US\$/(Oz/t)

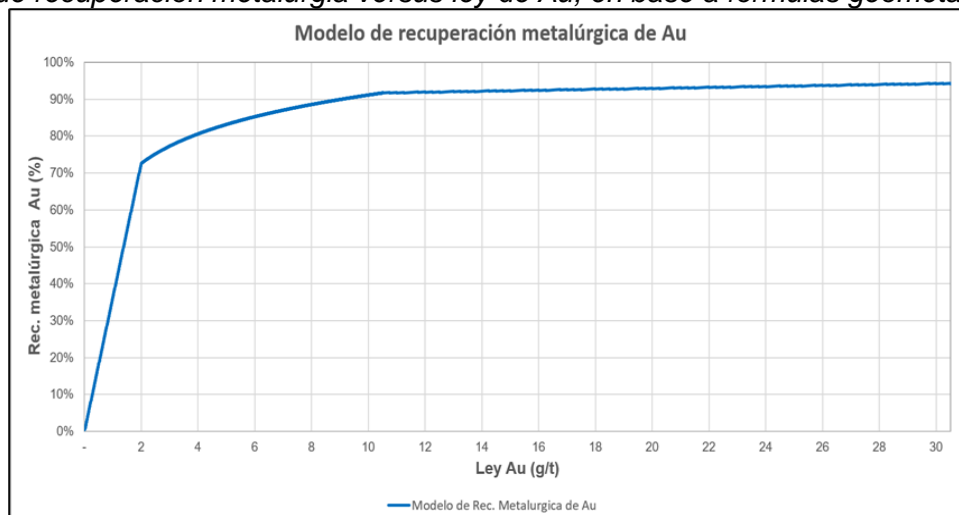
Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2.3 Retorno neto por fundición o NSR (US\$/t). Para efectos de simplificar las estimaciones, se incorpora el uso del valor NSR; para ello primero se calcularon las recuperaciones de acuerdo con el informe geometalúrgico del yacimiento en donde podemos encontrar las fórmulas para las recuperaciones tanto para el Au y la Ag, luego se estima el NSR para el elemento Au y Ag de forma separada considerando los términos comerciales emitidos y finalmente el NSR Total se calculó a partir de la suma de ambos, a continuación, veremos el proceso para el cálculo del NSR.

3.1.2.2.4 Recuperación metalúrgica de Oro. La curva de recuperación metalúrgica de Au se conforma en base a rangos de ley de Au, si la ley de Au se encuentra entre el mínimo (mayores a cero) y el valor de 2.00 g/t, se obtendrán valores de recuperación metalúrgica proporcionales a la ley de Au con el factor de 0.36341; si los valores de la ley de Au se encuentran en el rango de 2.00 g/t y 10.50 g/t, se obtendrá una recuperación metalúrgica que será la sumatoria del valor 0.6472 y la proporción de 0.11516 al logaritmo natural de la ley de Au; luego, si los valores de la ley de Au se encuentran en el rango de 10.50 g/t y 30.58 g/t, se obtendrá una recuperación metalúrgica que será la sumatoria del valor 0.904247 y la proporción de 0.001287 al logaritmo natural de la ley de Au; y por último, si los valores de la ley de Au son mayores a 30.58 g/t, se obtendrá el valor de recuperación metalúrgica flat de 94.36%. Esto podemos resumir en la Tabla 10:

Figura 27

Curva de recuperación metalurgia versus ley de Au, en base a formulas geometalúrgicas



Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

Tabla 9*Recuperación metalúrgica de Au (%)*

LEY Au (g/t)	FÓRMULA DE RECUPERACIÓN METALÚRGICA Au (%)
< 0.00; 2.00 >	0.36341 x Ley de Au
[2.00; 10.50 >	0.11516 x Ln (Ley de Au) + 0.6470
[10.5; 30.58 >	0.001287 x Ln (Ley de Au) + 0.904247
[30.58; ... >	0.9436

Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

3.1.2.2.5 Recuperación metalúrgica de Plata. La curva de recuperación metalúrgica de Ag se conforma en base a rangos de ley de Ag, si la ley de Ag se encuentra entre el mínimo (mayores a cero) y el valor de 0.25 Oz/t, se obtendrán valores de recuperación metalúrgica proporcionales a la ley de Ag con el factor de 2.34462; si los valores de la ley de Ag se encuentran en el rango de 0.25 Oz/t y 218.3 Oz/t, se obtendrá una recuperación metalúrgica que será la sumatoria del valor 0.81964 y la proporción de 0.01526 al logaritmo natural de la ley de Ag; por último, si los valores de la ley de Ag son mayores a 218.3 Oz/t, se obtendrá el valor de recuperación metalúrgica flat de 90.185%. Esto podemos resumir en la Tabla 10:

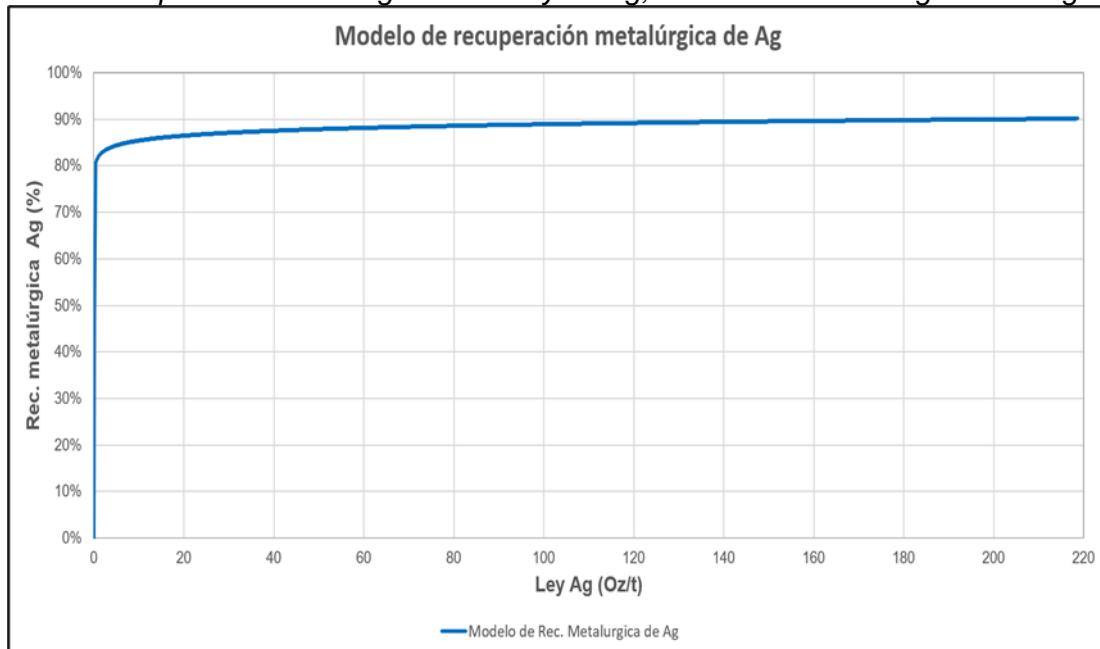
Tabla 10*Recuperación metalúrgica de Ag (%)*

LEY Ag (Oz/t)	FÓRMULA DE RECUPERACIÓN METALÚRGICA Ag (%)
< 0.00; 0.25 >	2.3446267578 x Ley de Ag
[0.25; 218.30 >	0.01526283 x Ln (Ley de Ag) + 0.819646
[218.30; ... >	0.90185

Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

Figura 28

Curva de recuperación metalurgia versus ley de Ag, en base a formulas geometalúrgicas



Fuente: Estudio de Prefactibilidad de Proyecto Subterráneo de Au (2020)

3.1.2.2.6 Cálculo del valor de NSR. A continuación, se resume el procedimiento para la estimación del NSR de cada bloque tal como se explicó en el capítulo anterior:

- Las fórmulas de recuperaciones metalúrgicas fueron aplicadas en el software Deswik.CAD mediante la utilización del comando “fórmula”.
- Se crean los campos alfanuméricos respectivos para el NSR_{Au} , NSR_{Ag} y NSR_{Total} con el fin de realizar el cálculo correspondiente.

La estimación de NSR para los metales oro (Au) y plata (Ag) se estimarán de la siguiente manera:

$$NSR_{Au} = Ley_{Au} * RM_{Au} * VP_{Au}$$

$$NSR_{Ag} = Ley_{Ag} * RM_{Ag} * VP_{Ag}$$

Finalmente, el cálculo de NSR total del bloque a evaluar quedará de la siguiente manera:

$$NSR_{Total} = NSR_{Au} + NSR_{Ag}$$

3.1.2.3 Método de minado. En estudios precedentes de este proyecto subterráneo, como en la fase de Ingeniería Conceptual, se analizaron alternativas de explotación siguiendo la metodología de Nicholas, matriz técnica de selección y análisis cualitativo-cuantitativo de método de explotación preseleccionados. Del análisis de la matriz, se concluyó que el método más conveniente para la explotación de vetas del yacimiento de la presente tesis sería de Tajeo por Subniveles o Taladros Largos (en su variante Bench and Fill) en dirección de explotación longitudinal, justificándose en la clasificación geomecánica y la geometría del cuerpo mineralizado.

3.1.2.4 Costos y parámetros operativos. Los parámetros operativos que se muestran en la Tabla 11, complementan la información necesaria para la generación de reservas. Se ha de mencionar que la dilución por descaje en las cajas techo y piso que son asignadas al modelo, refieren a un análisis concluyente de varias minas subterráneas que aplican el método de taladros largos en variante Bench and Fill (basado en históricos de porcentaje de dilución por descaje obtenidos con valor de 12%, facilita el cálculo de ELOS total, y así poder expresarlo en metros, permitiendo imputar valores a cada caja en software).

Tabla 11

Parámetros utilizados para generación de reservas

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Ancho de minado mínimo	1.50	m
Ancho de minado máximo	8.00	m
Altura de banco	16.00	m
Dilución externa por descaje (caja piso)	0.30	m
Dilución externa por descaje (caja techo)	0.30	m
Dilución externa por limpieza	7.00	%
Dilución externa por shotcrete	3.00	%
NSR cut off Económico	Depende del caso de evaluación	US\$/t
Recuperación minera	90.00	%
Días por año	365	días

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 *Procesamiento de datos e inputs calculados*

3.1.3.1 Estimación de reservas minerales. En esta sección, se detalla el proceso metodológico seguido para la estimación de reservas minerales, un componente crítico en la evaluación de cualquier proyecto minero. La estimación precisa de reservas es fundamental para la planificación y el diseño de las operaciones mineras, ya que determina la viabilidad económica del proyecto y guía la toma de decisiones estratégicas. Se describen a continuación los pasos que conforman este procedimiento, ver Figura 29.

3.1.3.1.1 *Procedimiento de estimación de reservas minerales.*

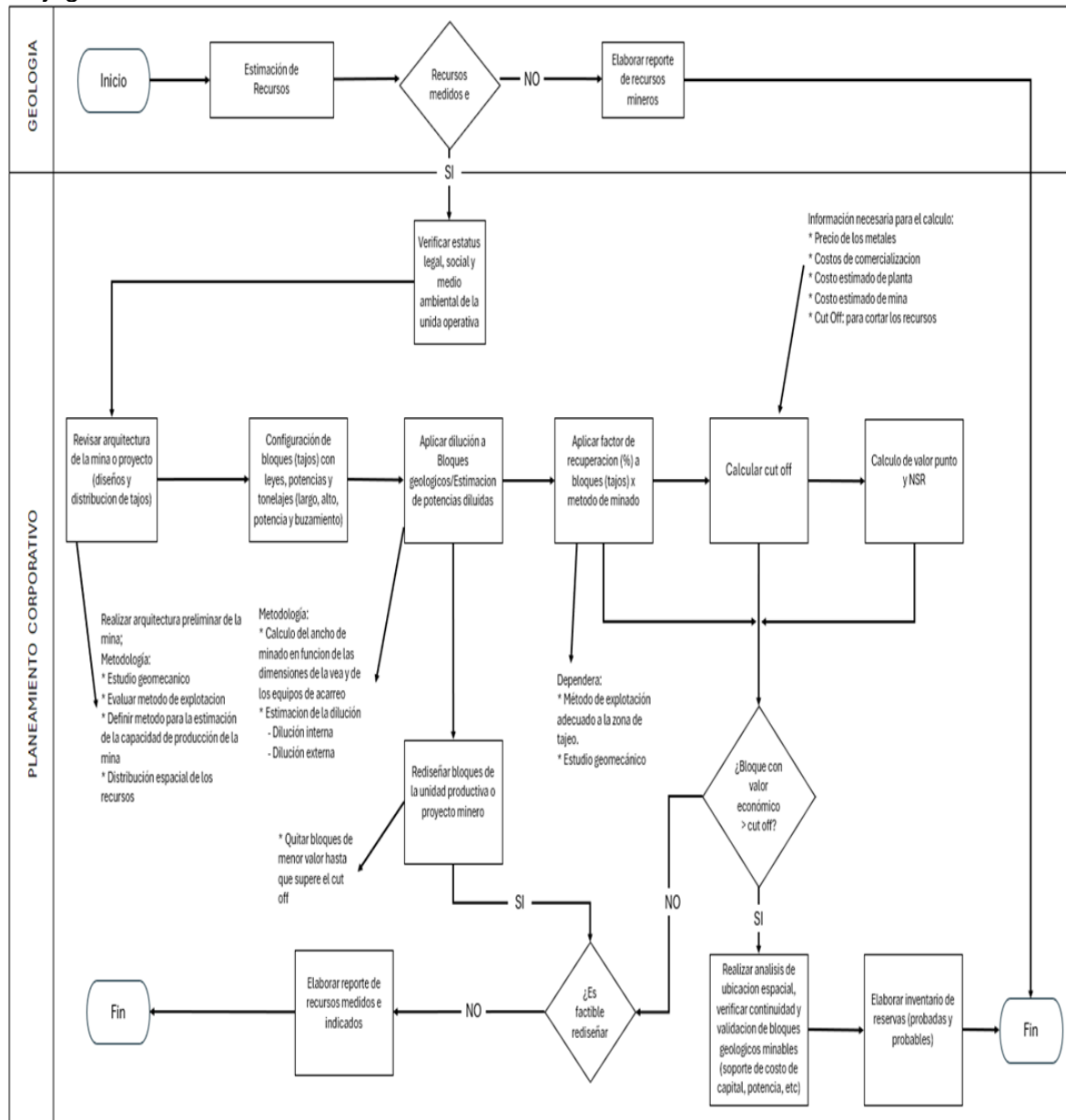
- Estimación de recursos: Esta actividad es desarrollada por el área de Geología, el cual entrega un Modelo de Bloques con información mínima de categoría de recursos (Medidos, Indicados o Inferidos), Densidad, Leyes de Minerales, Zonas de Ubicación o Nombre de Vetas, Zona Minada. Adicional a los parámetros geológicos mencionados, puede haber más información dependiendo de la necesidad.
- Para la estimación se toman los bloques con categoría de Medidos e Indicados, se revisa la consistencia de la información y se desarrolla cuadros de tonelaje y ley, finalmente la información de este cuadro debe ser cruzada con Geología. El resto de la información de bloques cuya categoría es inferido es referencial y no entra en el proceso de estimación.
- Con la ubicación espacial de los bloques cuya categoría son medidos e indicados, se revisa la información legal y social de la zona a minar, es decir, si los permisos con las entidades del estado están en orden, si existe algún evento social o medio ambiental de relevancia, como, por ejemplo, los permisos en temas hidrogeológicos, posibles subsidencias en poblaciones cercanas, zonas arqueológicas cercanas que no se tomó en cuenta dentro del CIRA, etc.
- Obtenido el universo de recursos, se procede a la generación de stopes en el software de diseño minero Deswik.CAD, para ello, es necesario configurar el mismo en base a los parámetros operativos del método de Tajeo por subniveles (que se definieron en la Tabla 12) y las dimensiones del modelo de bloques con lo que se

podrá definir las alturas de corte o banco. Para las dimensiones longitudinales estas estarán ligados a la distancia del disparo o el valor de optimización requerido.

- Se debe configurar de igual manera la dilución, valores que deben incluir: dilución planeada o interna y la no planeada o externa.
- Se debe tener en cuenta el factor de recuperación minera, que es el tonelaje extraído sobre el tonelaje estimado.
- El input de valor del cut off a aplicar estará en base a cada escenario evaluado del Hill of Value (valores de cut off que variaran desde 60 US\$/t a los 200 US\$/t).
- Los stopes se valorizarán en base a la estimación de NSR, el cual se estimará usando información de precios, gastos de venta y recuperación metalúrgica. Este valor es insertado en el modelo de bloques.
- Con la información previa y con el soporte del software de diseño minero Deswik.CAD se ejecuta la herramienta Stope Optimizer denominada Deswik.SO, el cual busca las formas óptimas de minado teniendo en cuenta la geometría del yacimiento. Una vez generado los sólidos óptimos minables, se clasificarán en dos grupos los stopes, stopes con valores de NSR por encima del valor del cut off, y el recurso que no pasó el valor del cut off analizado en el caso.
- Con el grupo de stopes que está por encima del valor del cut off, se procede a un análisis de verificación de continuidad, es decir, que los stopes que no estén alejados de las zonas de producción.
- Con la información del Recurso que no fue transformado a reservas y los stopes aislados, se evalúa si se puede hacer alguna subdivisión en los stopes (uso de herramienta subshell que nos brinda el software minero) tanto en la altura como en dirección longitudinal para una mejor recuperación.
- El recurso que después del análisis y generación continua sin pasar el valor del cut off analizado, quedará como Medido e Indicado, entrando al Inventario de Recursos
- Finalmente, con la información el paso j), y la reevaluación del paso k), se desarrolla el Inventario de Reservas.

Figura 29

Flujograma de estimación de reservas minerales



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 Estimación de CAPEX y OPEX.

3.1.3.2.1 Inversiones (CAPEX) y costos operativos (OPEX). Como se definió anteriormente, para la estimación de la inversión y costos operativos de cada capacidad de producción a analizar, se requiere aplicar el método de ajuste exponencial de la capacidad de Williams y para ello, es necesario recopilar información de CAPEX y OPEX de proyectos mineros subterráneos que ya están en operación con el método de Taladros Largos en su variante Bench and Fill y que tengan similares parámetros técnicos,

económicos y operativos al yacimiento en estudio en la presente tesis. Esta data base se resume en la Tabla 12 y tendrá como base la variable dependiente del ritmo de producción mina diaria (tpd) del proyecto en operación:

Tabla 12

Resumen de datos Capex y Opex en proyectos mineros tipo

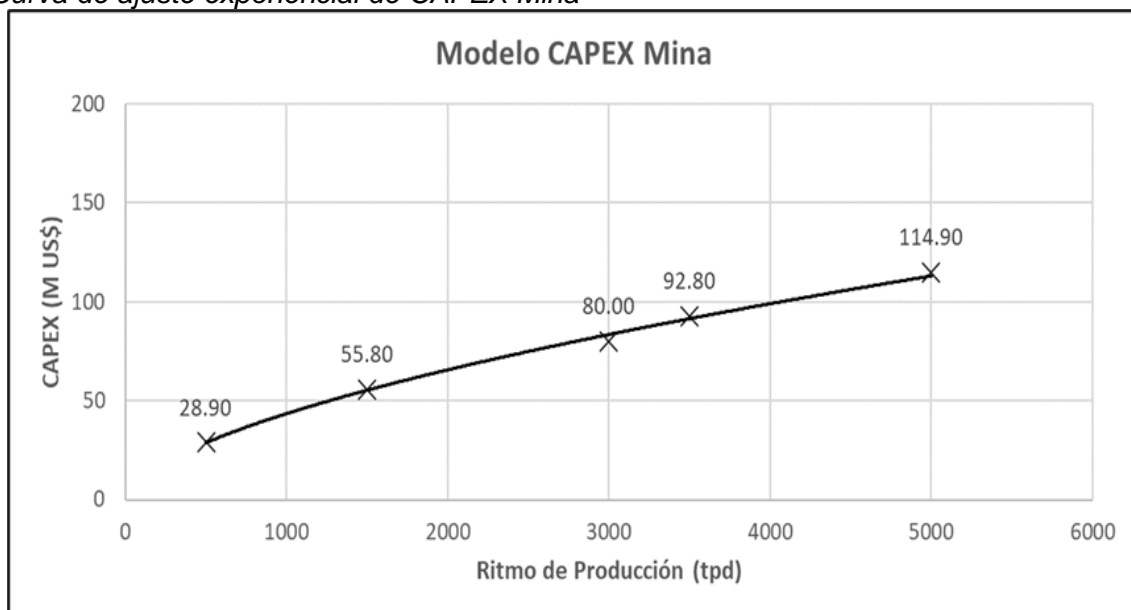
CAPACIDAD (tpd)	CAPEX Mina (M US\$)	CAPEX Planta (M US\$)	CAPEX Infraestructura (M US\$)	CAPEX Total (M US\$)	OPEX (US\$/t)
500	28.9	41.9	28.6	99.3	173.71
1,500	55.8	80.9	41.0	177.8	119.17
3,000	80.0	90.0	54.3	224.3	93.95
3,500	92.8	134.5	54.3	281.6	89.12
5,000	114.9	166.6	61.1	342.6	78.85

Fuente: Elaboración propia

En base a los datos de la Tabla 12, se estimaron las curvas modelo necesarias para aplicar el ajuste exponencial de la capacidad de Williams en los distintos componentes de inversión y costos operativos. Estas curvas incluyen CAPEX Mina, CAPEX Planta, CAPEX Infraestructura y OPEX, permitiendo una proyección ajustada a cada uno de estos aspectos clave del proyecto subterráneo.

Figura 30

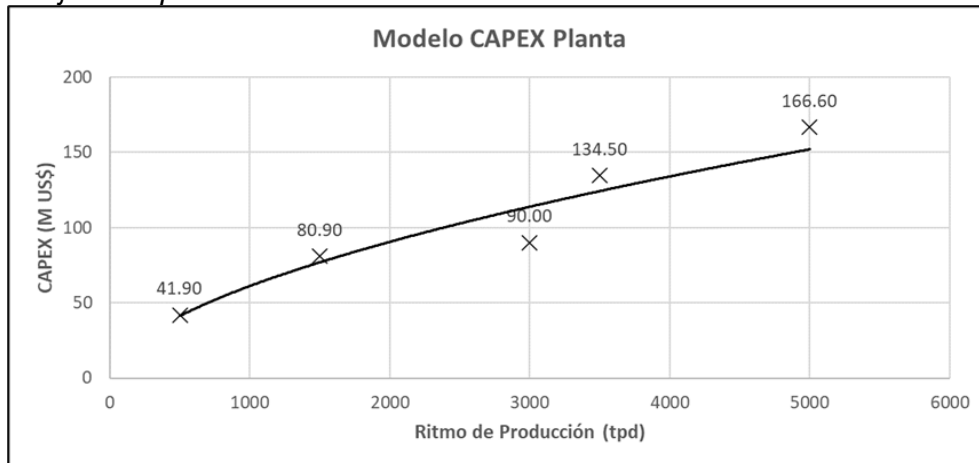
Curva de ajuste exponencial de CAPEX Mina



Fuente: Elaboración propia

Figura 31

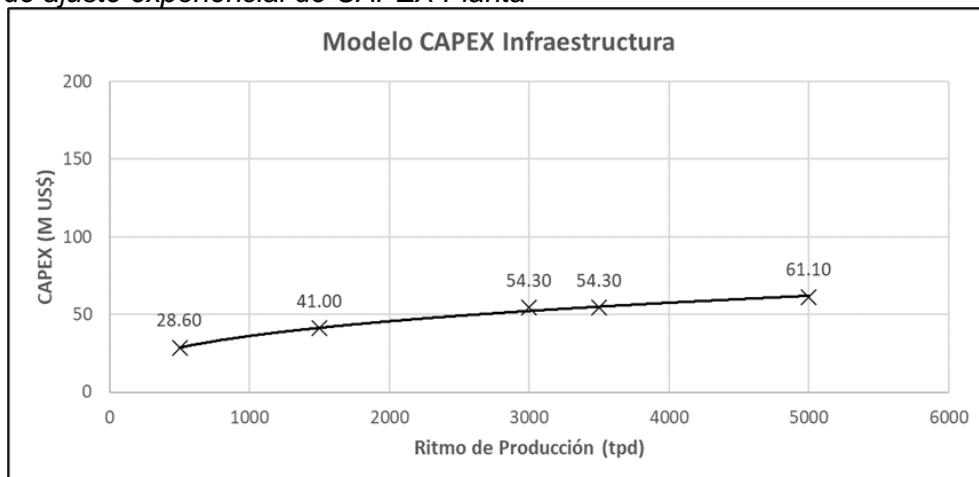
Curva de ajuste exponencial de CAPEX Planta



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

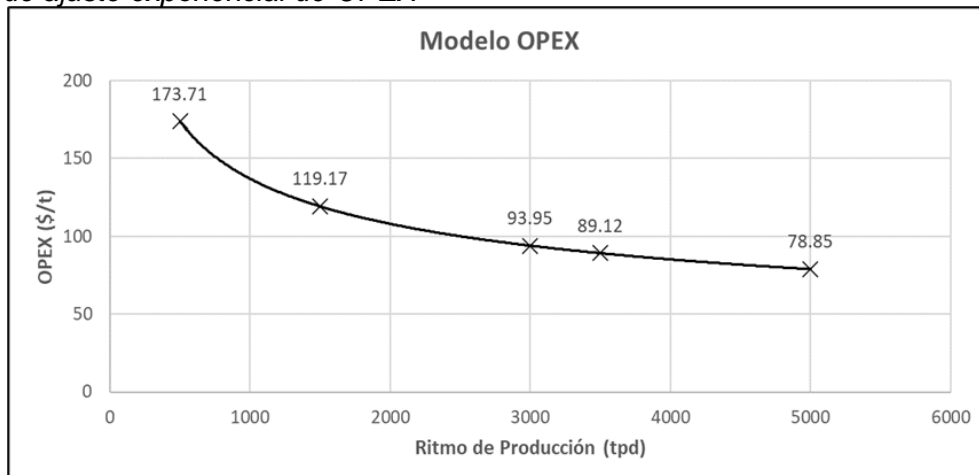
Curva de ajuste exponencial de CAPEX Planta



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

Curva de ajuste exponencial de OPEX



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 13 presenta los modelos matemáticos de ajuste exponencial utilizados para estimar los costos de CAPEX y OPEX. En ella se muestran las funciones exponenciales específicas para la estimación de CAPEX Mina, CAPEX Planta, CAPEX Infraestructura, CAPEX Total, Sustaining CAPEX Mina, Sustaining CAPEX Planta y OPEX en función del ritmo de producción mina diario (tpd).

Es importante destacar que, en la aplicación de la metodología HoV mejorada, se considerara tanto el perfil de inversiones a lo largo del tiempo, definida anteriormente, como el Sustaining CAPEX anual de cada escenario. Estos valores se estiman a partir de promedios históricos de inversión en minas similares. Para el Sustaining CAPEX de mina se estima el 3.5% de la inversión inicial del CAPEX Mina, mientras que para el Sustaining CAPEX Planta, se ha calculado el 2.0% de la inversión inicial del CAPEX Planta.

Tabla 13

Función matemática exponencial para estimación de CAPEX y OPEX

DESCRIPCIÓN	MODELO MATEMÁTICO DE AJUSTE EXPONENCIAL
CAPEX Mina	$0.7188 * (\text{tpd})^{0.5939}$
CAPEX Planta	$0.9521 * (\text{tpd})^{0.5972}$
CAPEX Infraestructura	$3.6732 * (\text{tpd})^{0.3300}$
CAPEX Total	CAPEX Mina + CAPEX Planta + CAPEX Infraestructura
SUSTAINING CAPEX Mina	$3.5\% * \text{CAPEX Mina}$
SUSTAINING CAPEX Planta	$2.0\% * \text{CAPEX Planta}$
OPEX	$1,464.1 * (\text{tpd})^{-0.343}$

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 14 muestra los valores CAPEX Mina, CAPEX Planta, CAPEX Infraestructura, CAPEX Total, Sustaining CAPEX Mina, Sustaining CAPEX Planta y OPEX, estimados para cada uno de los 27 ritmos de producción (ritmos de producción que varían desde las 1,000tpd hasta las 3,600 tpd), estos valores fueron estimados aplicando los modelos matemáticos de ajuste exponencial de capacidad ajustada mostrada en la Tabla 14, proporcionando una visión integral de las necesidades de inversión y costos operativos para diferentes escalas de producción.

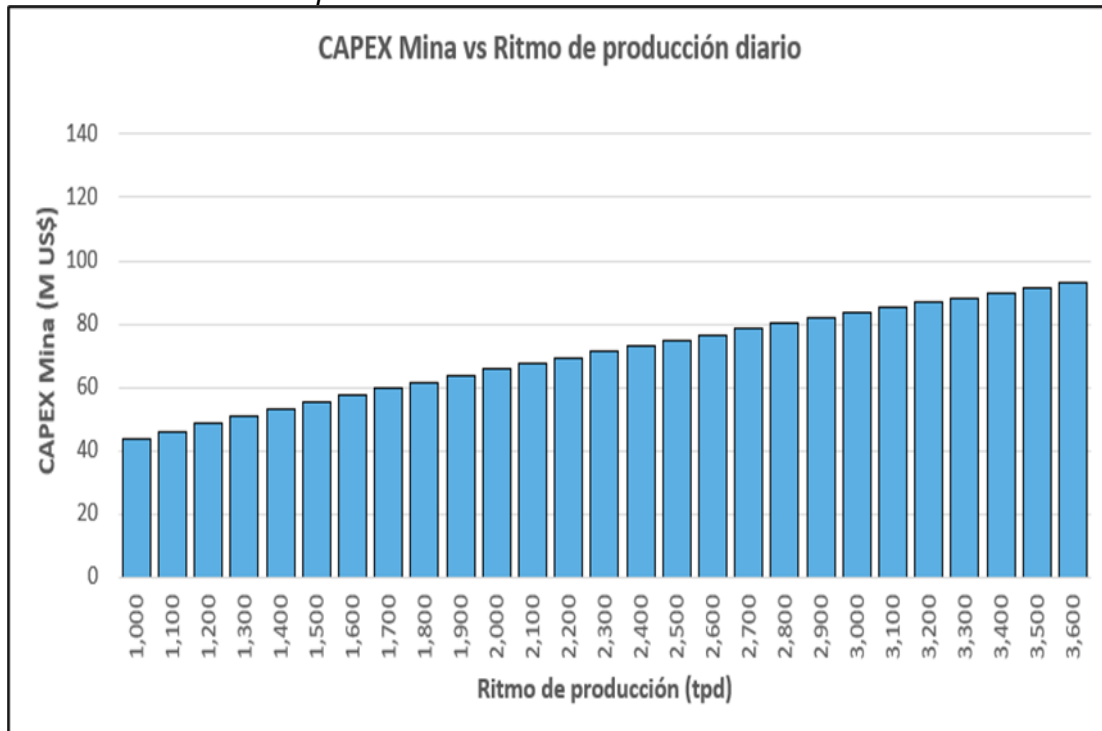
Tabla 14*Estimación de CAPEX y OPEX para diferentes ritmos de producción*

ROP (tpd)	CAPEX Mina (M US\$)	CAPEX Planta (M US\$)	CAPEX Infraestructura (M US\$)	CAPEX Total (M US\$)	SUST. CAPEX Mina (M US\$)	SUST. CAPEX Planta (M US\$)	OPEX (\$/t)
1,000	43.45	61.06	35.90	140.41	1.52	1.22	142.18
1,100	45.98	64.46	37.04	147.48	1.61	1.29	135.65
1,200	48.42	67.72	38.12	154.26	1.69	1.35	130.21
1,300	50.78	70.86	39.14	160.78	1.78	1.42	125.61
1,400	53.06	73.90	40.11	167.08	1.86	1.48	121.67
1,500	55.28	76.85	41.04	173.17	1.93	1.54	118.25
1,600	57.44	79.71	41.92	179.08	2.01	1.59	115.26
1,700	59.55	82.50	42.77	184.82	2.08	1.65	112.62
1,800	61.61	85.22	43.58	190.41	2.16	1.70	110.28
1,900	63.62	87.87	44.36	195.85	2.23	1.76	108.18
2,000	65.59	90.46	45.12	201.17	2.30	1.81	106.29
2,100	67.52	93.00	45.85	206.37	2.36	1.86	104.58
2,200	69.41	95.49	46.56	211.46	2.43	1.91	103.03
2,300	71.26	97.92	47.25	216.44	2.49	1.96	101.61
2,400	73.09	100.32	47.92	221.32	2.56	2.01	100.31
2,500	74.88	102.67	48.57	226.12	2.62	2.05	99.11
2,600	76.65	104.97	49.20	230.82	2.68	2.10	98.01
2,700	78.39	107.24	49.82	235.45	2.74	2.14	96.98
2,800	80.10	109.48	50.42	240.00	2.80	2.19	96.03
2,900	81.78	111.68	51.01	244.47	2.86	2.23	95.15
3,000	83.45	113.85	51.58	248.88	2.92	2.28	94.33
3,100	85.09	115.98	52.14	253.21	2.98	2.32	93.55
3,200	86.71	118.09	52.69	257.49	3.03	2.36	92.83
3,300	88.31	120.17	53.23	261.71	3.09	2.40	92.15
3,400	89.89	122.22	53.76	265.86	3.15	2.44	91.51
3,500	91.45	124.24	54.27	269.97	3.20	2.48	90.91
3,600	92.99	126.25	54.78	274.02	3.25	2.52	90.34

Fuente: Elaboración propia

Figura 34

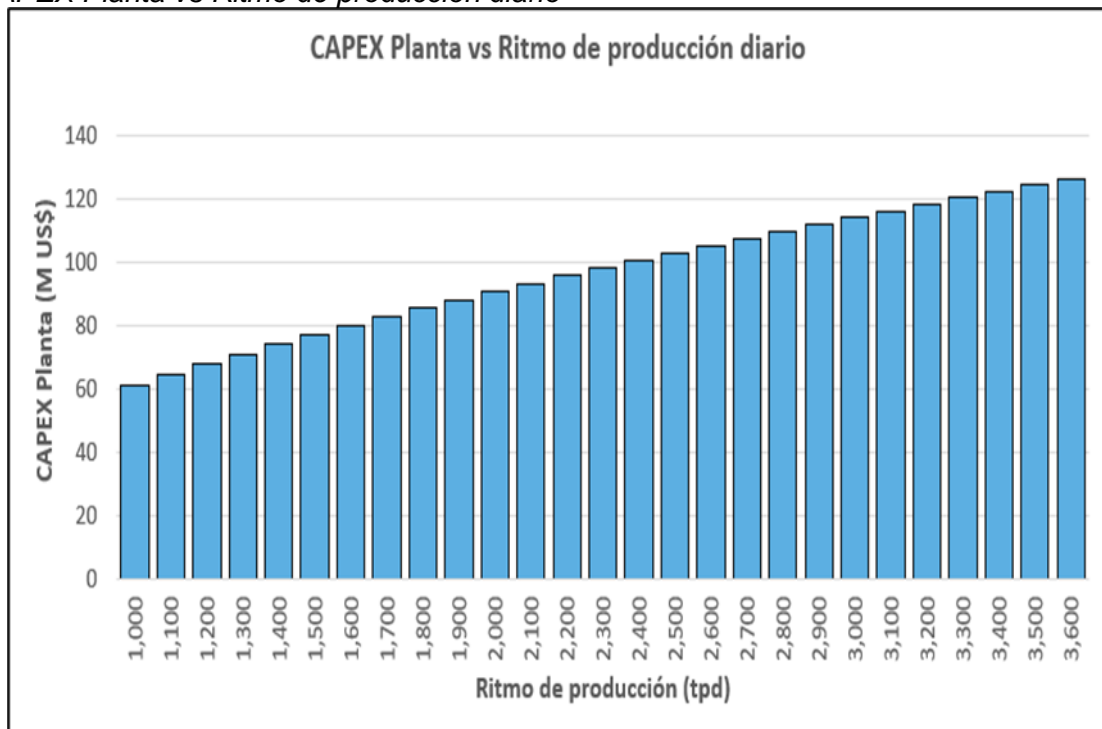
CAPEX Mina vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

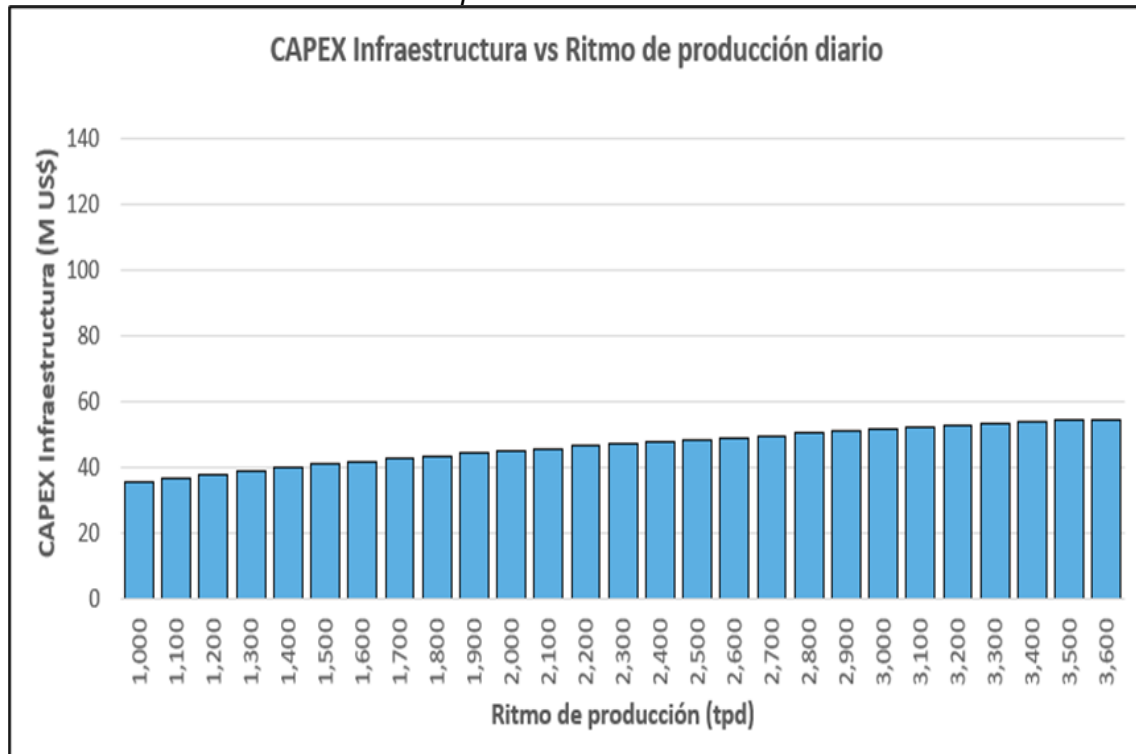
CAPEX Planta vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

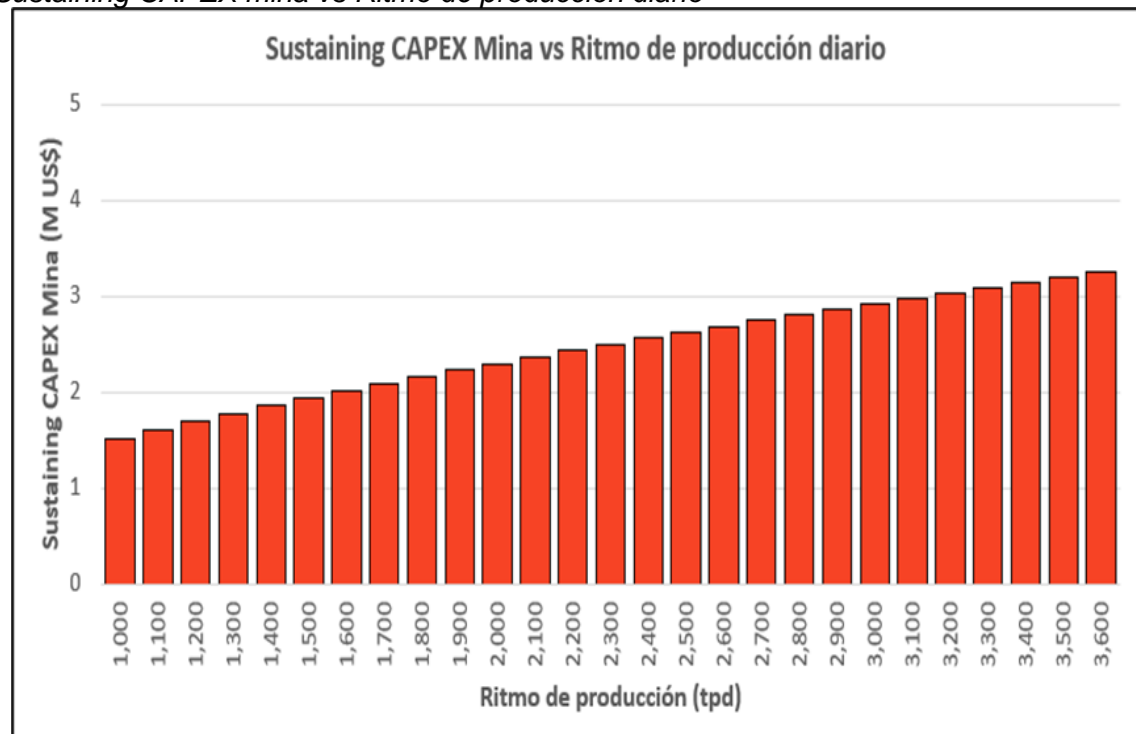
CAPEX Infraestructura vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

Figura 37

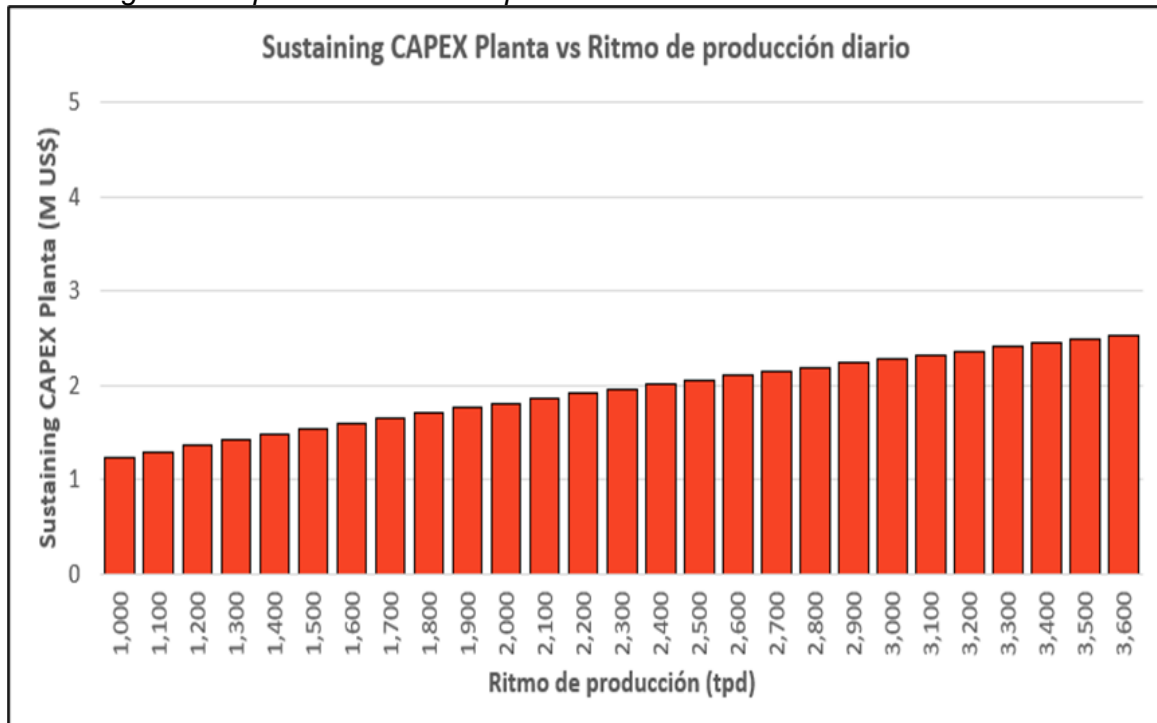
Sustaining CAPEX mina vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

Figura 38

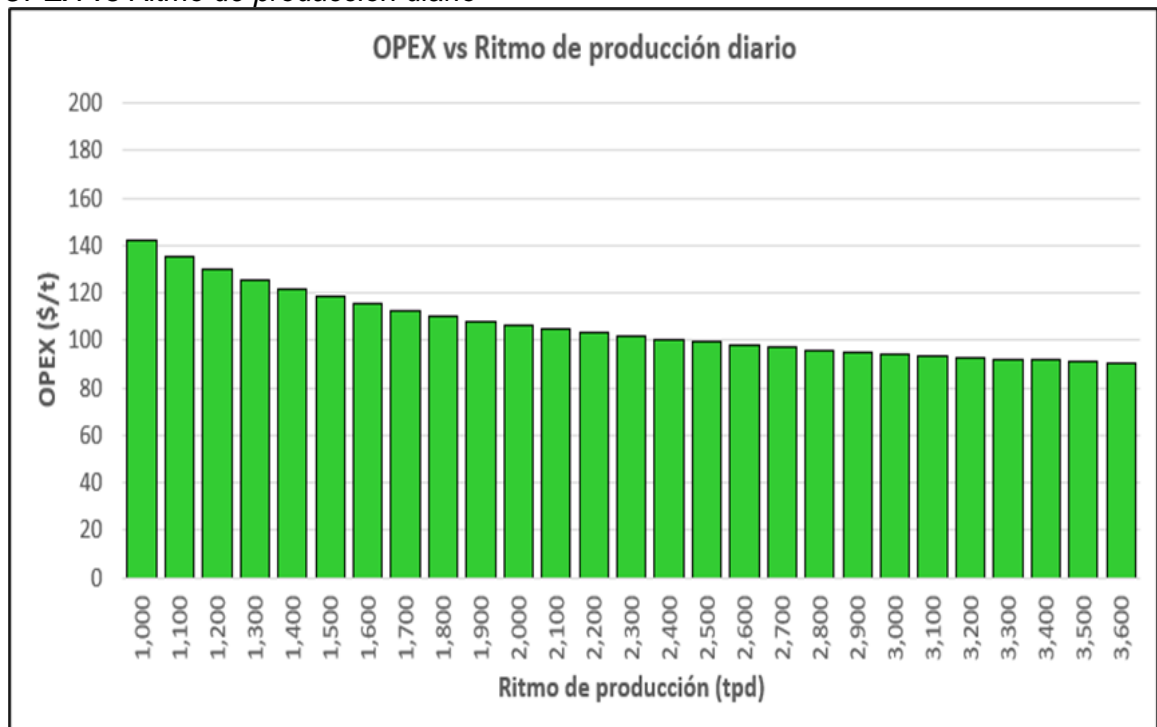
Sustaining CAPEX planta vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

OPEX vs Ritmo de producción diario



Fuente: Elaboración propia

3.2 Aplicación metodológica comparativa HoV

La correcta valorización y planificación de proyectos mineros subterráneos es crucial para maximizar la rentabilidad y viabilidad de las operaciones mineras. En este contexto, la metodología de investigación utilizada es de importancia fundamental en la determinación del Valor Actual Neto (VAN) y en la optimización del proceso de explotación.

Tradicionalmente, se utiliza el método de Breakeven cut off para seleccionar reservas y desarrollar planes mineros. Este enfoque ampliamente utilizado, a menudo se basa en valores de corte predefinidos que pueden no reflejar la verdadera potencialidad económica del depósito mineral debido a su naturaleza estática y simplificada.

Para abordar estas limitaciones, la metodología Hill of Value (HoV), propuesta por Brian Hall, ofrece un enfoque más avanzado y adaptativo. Esta metodología permite una evaluación más precisa al considerar un rango de valores cut off y escenarios económicos, proporcionando una visión más dinámica y optimizada del VAN. Sin embargo, el modelo HoV tradicional también presenta áreas posibles de mejora, particularmente en la incorporación de variables como la variabilidad en la capacidad de producción y las inversiones a lo largo del tiempo. Para abordar estas limitaciones, se propone una versión mejorada del HoV que integra estas variables dinámicas, ofreciendo una visión más realista y precisa de la optimización del valor económico del proyecto minero.

Esta tesis se enfoca en un proyecto minero subterráneo de Au que se explota por el método de taladros largos en su variante Bench and Fill, integrando la metodología Hill of Value para maximizar el valor del proyecto. En este capítulo, se detalla la metodología de trabajo que integra tanto el enfoque tradicional como el mejorado de HoV.

Se describe el proceso secuencial para la aplicación de la metodología HoV, destacando sus pasos y ajustes para la optimización del VAN. Además, se presenta la versión mejorada de la metodología, que busca superar las limitaciones del modelo tradicional al incorporar consideraciones adicionales como la variabilidad en las leyes del mineral y las inversiones distribuidas en el tiempo. A través de este enfoque, se pretende

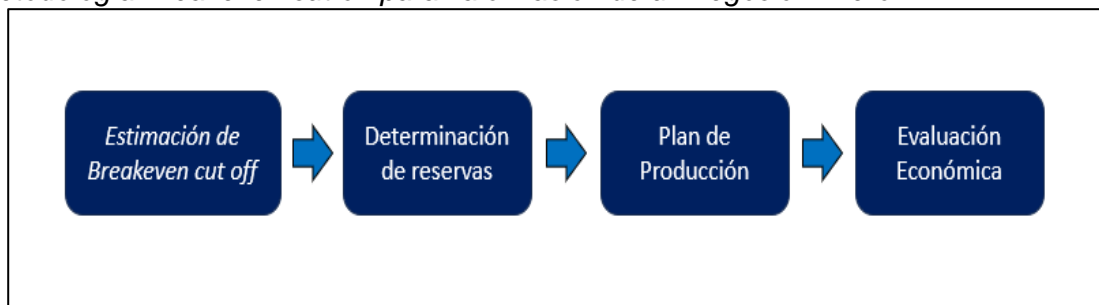
ofrecer una visión integral y detallada para la valorización efectiva de proyectos mineros subterráneos.

3.2.1 Metodología Hill of Value (HoV)

En la valorización de un proyecto minero subterráneo de Au, especialmente cuando se utiliza el método de taladros largos, es común aplicar una metodología secuencial para la selección y evaluación económica del proyecto, como se ilustra en la Figura 40. El proceso inicia con la selección de reservas basadas en el valor del breakeven cut off estimado, seguido por la elaboración de un plan minero. Posteriormente, se evalúa económicamente el plan considerando ingresos, costos e inversiones de capital, en lo que se conoce como el modelo de valorización tradicional del breakeven cut off.

Figura 40

Metodología Breakeven cut off para valorización de un negocio minero



Fuente: Elaboración propia

No obstante, esta metodología convencional tiende a inducir a la selección de reservas basadas en uno o dos valores de cut off, elegidos de manera arbitraria. Por lo tanto, el plan minero asociado a esta metodología no necesariamente será el óptimo para el negocio minero. En una etapa inicial de un proyecto, como un estudio conceptual o prefactibilidad, esta es la metodología más utilizada en la gran mayoría de los casos en la industria minera de proyectos mineros.

Para optimizar los proyectos mineros, surge la metodología heurística conocida como el Hill of Value, planteado por de Brian Hall. Las principales conclusiones de este enfoque son:

- Seleccionar reservas con un valor de cut off mayor al cut off económico, incrementará el VAN.

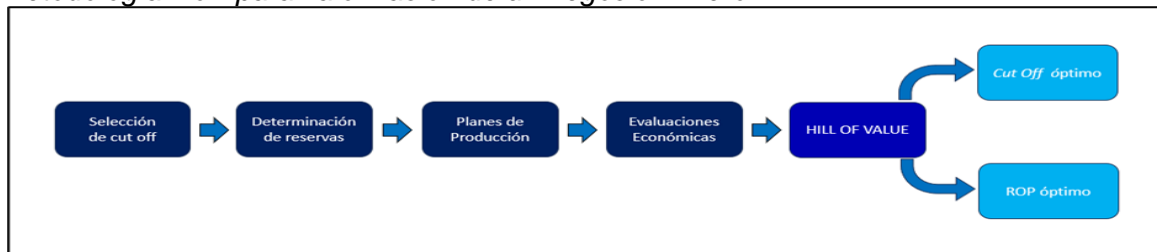
- La metodología de Hill of Value permite determinar el rango de cut off óptimo para maximizar el VAN.
- El VAN estimado mediante Hill of Value genera un valor de magnitud mayor al estimado por un plan minero, por lo que su valor nominal debe utilizarse como referencia o para un análisis comparativo.

La Figura 41 muestra un esquema de la metodología Hill of Value, donde se describe el proceso de optimización del VAN a través de la selección de reservas en función de un rango de cut offs. Este esquema resalta como la metodología facilita la identificación de un cut off y ritmo de producción que maximizan el VAN del proyecto, a diferencia de los métodos tradicionales que suelen enfocarse en único cut off.

A partir de este esquema, se pueden identificar varias ventajas clave de la metodología HoV. Entre ellas, destacan la reducción en el tiempo necesario para su implementación y flexibilidad para emplear un rango de cut off que optimice el VAN, ofreciendo una visión más integral y estratégica en la planificación minera.

Figura 41

Metodología HoV para valorización de un negocio minero



Fuente: Elaboración propia

Para la aplicación de la metodología con Hill of Value, será necesario realizar los siguientes pasos secuenciales:

- Definición de parámetros técnico-económicos.
- Generación de stopes en base a las dimensiones de los tajos de explotación ya definidos en el estudio geomecánico a nivel de factibilidad para el método de explotación Bench & Fill.
- Aplicación de dilución interna y externas definidas entre los rangos operativos para el tipo de estructura en el método de Bench & Fill.

- Valorización de cada bloque de acuerdo con los parámetros económicos definidos.
- Cubicación de reservas seleccionadas para cada nivel de explotación con base en los modificadores operativos.
- Desde la primera viñeta hasta la anterior, se realizará el ejercicio contemplando distintos valores de cut off, tomando hasta 29 valores de cut off diferentes (valores de cut off que irán incrementándose en valores de 5.00 US\$/t, desde los 60 US\$/t hasta los 200 US\$/t).
- Generación del plan de producción para los 783 escenarios (basado en la combinación de los 29 valores de cut off y en 27 ritmos de producción, ritmos de producción que irán incrementándose en valores de 100tpd, desde las 1,000tpd hasta las 3,600tpd).
- Escalamiento de costos operativos OPEX para cada plan de producción.
- Escalamiento de costos de capital CAPEX para cada plan de producción.
- Se estimará el VAN para cada uno de los 783 escenarios, esto basado en la combinación de los 27 ritmos de producción y los 29 valores de cut off. Se seleccionará el valor de cut off que maximiza el VAN.
- Para el cut off óptimo seleccionado en el paso j), se analizarán los 27 valores de ritmo de producción para dicho cut off y se seleccionará el valor de ritmo de producción que genere mayor VAN.

3.2.2 Metodología Hill of Value mejorada

Como se sabe, la preparación de un plan minero en un proyecto de mina subterránea es un proceso complejo que involucra múltiples etapas y que puede requerir tiempos prolongados para su ejecución. Este proceso no solo debe considerar las reservas y condiciones geológicas, sino también una serie de restricciones como la presencia de agua, la existencia de contaminantes en minerales de alta ley (por ejemplo, arsénico o plomo), y la coexistencia con otros sectores en explotación. Además, se deben generar y evaluar distintas estrategias de extracción, cada una de las cuales derivaría en un plan minero diferente.

Para abordar estas limitaciones y optimizar el proceso de planificación, la tesis se enfoca en la aplicación de una versión mejorada de la metodología Hill of Value (HoV). Esta versión mejorada busca obtener resultados óptimos tanto para el cut off como para el ritmo de producción, requiriéndose menos tiempo en la elaboración del plan minero.

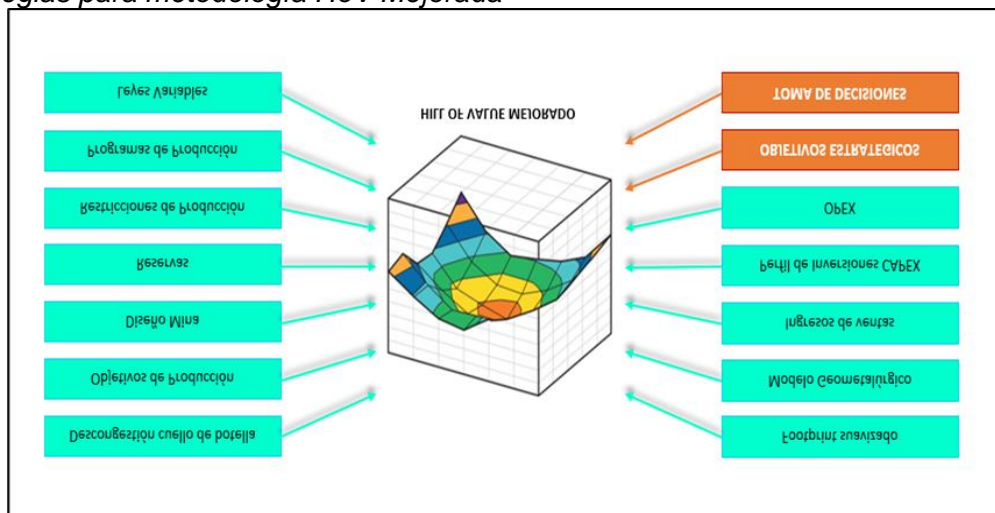
Adoptando un enfoque holístico, la metodología mejorada abarca todos los procesos del sistema minero, evitando simplificaciones técnicas que pueden llevar a una optimización parcial y subóptima. La estrategia de optimización se centra en los factores que realmente impulsan el valor del negocio en lugar de enfocarse únicamente en indicadores claves de desempeño (KPI) o buscar resultados positivos.

La metodología Hill of Value mejorada, propuesta en la tesis, proporciona una visión más dinámica y completa al incorporar consideraciones adicionales, como la variabilidad en la capacidad de producción y las inversiones distribuidas en el tiempo. Este enfoque integral es esencial para reflejar con mayor precisión las condiciones reales de un proyecto minero subterráneo, maximizando su valor y optimizando el uso de recursos estratégicos.

En la Figura 42 se muestran las diversas estrategias que forman parte de la metodología HoV mejorada. Sin embargo, es importante considerar que, aunque estas estrategias ofrecen un marco integral, simplificaciones inevitables en su aplicación pueden llevar a una distorsión en la estimación del Valor Actual Neto (VAN).

Figura 42

Estrategias para metodología HoV Mejorada

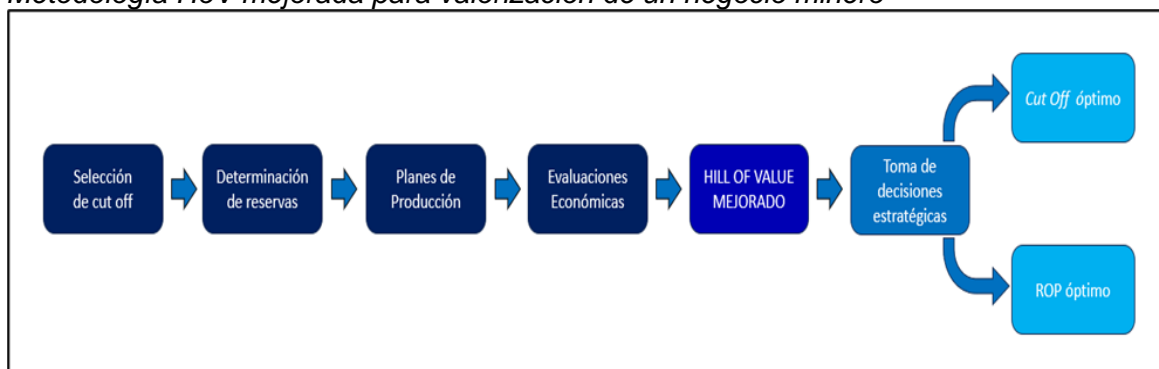


Fuente: Elaboración propia

Con el fin de mitigar estos posibles efectos y aproximarse a un escenario de planificación minera más eficiente, se introduce una etapa adicional denominada “Toma de decisiones estratégicas”, representada en la Figura 43, la cual integra consideraciones más detalladas y garantiza una alineación más precisa con los objetivos del proyecto.

Figura 43

Metodología HoV mejorada para valorización de un negocio minero



Fuente: Elaboración propia

Para mejorar el Hill of Value Tradicional, se incorporaron soluciones a las diversas simplificaciones identificadas, tal como se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15

Comparación cualitativa entre las metodologías HoV Tradicional y Mejorada para la estimación del VAN

VAN estimado por Metodología HoV Tradicional	VAN estimado por Metodología HoV Mejorada
Capacidad de producción constante	Capacidad de producción variable en el tiempo
Ley media constante	Ley media variable
Gasto de capital en el año previo al inicio de producción	Perfil de inversiones a lo largo de la duración del proyecto
Se trabaja con las reservas generadas	Limpieza de reservas (Footprint suavizado)
Recuperación minera 100% (OP)	Recuperación minera menor al 100% (UG)
Modelo Económico Determinístico	Modelo Económico Estocástico

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan las consideraciones específicas a aplicar en la metodología mejorada:

3.2.2.1 Capacidad de producción variable. Para definir las capacidades de producción variable en el tiempo es necesario definir el criterio que permita establecer los tiempos y régimen de producción en los periodos de ramp-up, producción y ramp-down.

Para este caso de estudio, cada escenario considerará que, en el Año 0 el ritmo de producción será de 50% del ritmo de producción determinado, para el Año 1 el ritmo de producción incrementará al 75% del ritmo de producción determinado y a partir del Año 2 se alcanzará el 100% de capacidad productiva del ritmo de producción establecido, el cual se mantendrá hasta un año antes del LOM. Para el último año del LOM el ritmo de producción estará en base a las reservas remanentes. En base a esto se definen 783 perfiles productivos (27 ritmos de producción para 29 valores de cut off).

3.2.2.2 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 en esta metodología mejorada es considerar que, en los primeros años del LOM, específicamente los que corresponden al ramp-up se trabajará con la ley de mayor valor del yacimiento (valores con mayor calidad de mineral que se tomaran del Nv. 4600 del yacimiento basados en el modelo de Rendu), luego en el periodo donde el régimen de producción alcance el ritmo de producción determinado por el escenario se utilizara la ley media del yacimiento y finalmente, para el último año de producción se trabajará con el valor de ley más baja el cual corresponderá al valor del cut off de cada escenario. Cabe resaltar que, el contenido metálico total del yacimiento se debe mantener constante, es decir, la suma de los productos de tonelajes por las leyes para cada año debe ser igual al producto del tonelaje total por la ley media del yacimiento. En base a lo descrito anteriormente, se construyeron los 783 perfiles tomados de los 27 ritmos de producción y 29 valores de cut off.

3.2.2.3 Perfil de inversiones distribuidas en el tiempo. Las inversiones que se tomarán en cuenta para este proyecto de estudio de mina subterránea serán:

3.2.2.3.1 Inversiones de capital o CAPEX. Las inversiones de Capital o CAPEX estarán distribuidas en inversiones de capital para mina, inversiones de capital para planta de beneficio e inversiones de capital para infraestructura del proyecto. La distribución de las inversiones en el tiempo será de 30%, 50% y 20% para los años -2, -1 y 0 respectivamente, donde el año cero es el primer año productivo en el cual empieza el ramp-

up. Los datos de los porcentajes mencionados fueron obtenidos de varios proyectos de mina subterránea con método de explotación de Taladros Largos que tienen una distribución similar de inversiones en el tiempo que, por motivos de confidencialidad, no pueden ser referenciados.

3.2.2.3.2 Inversiones de capital de sostenimiento o sustaining CAPEX. Las inversiones de Capital de Sostenimiento o Sustaining CAPEX serán las inversiones que tendrán la funcionalidad de dar sostenimiento a la operación a lo largo de la vida de la mina, estas inversiones se contemplarán de forma anual y serán consideradas desde el año 1 hasta el penúltimo año de la vida de la mina.

Estas inversiones (CAPEX y Sustaining CAPEX) serán consideradas de naturaleza variable y dependerán directamente del ritmo de producción asociado a cada escenario, para estimar el valor de los montos de inversión mencionados para cada escenario es conveniente utilizar curvas de escalamiento de inversiones, que estarán basados en datos de minas subterráneas con el mismo método de explotación del proyecto de estudio, Taladros Largos con la variante Bench and Fill.

3.2.2.4 Limpieza de reservas o footprint suavizado. El footprint suavizado es aquella limpieza de bloques de explotación que pueden resultar en vetas no continuas o zonas aisladas, ya que al aplicarse un valor de cut off a la selección de reservas este proceso únicamente evalúa la conveniencia de extraer un nivel o zona mineralizada considerando el beneficio económico. Es necesario suavizar el footprint, con el fin de darle la continuidad esperada al método de Taladros Largos, este footprint resultante lo denominaremos footprint suavizado. A medida que se logra una mayor continuidad en las reservas, el footprint se aproxima al diseño operativo de la mina, al minimizar la inclusión de material estéril y reducir la preparación y desarrollo de la mina para explotación de zonas aisladas.

No suavizar el footprint, conllevaría a incluir en el programa de producción los bloques de reservas que no tengan razonabilidad de explotación debido a que se encuentren aislados, sobreestimando así el valor del proyecto como lo hace la metodología

de HoV estándar; por otro lado, no realizar el suavizado del footprint también derivaría a obtener un programa de producción sesgado y que no pueda llevarse a cabo en la práctica debido a las dificultades de explotación de bloques aislados o discontinuos de la matriz de las reservas.

3.2.2.5 Recuperación minera. Para el método de explotación de Taladros Largos con variante denominada Bench & Fill, la recuperación minera utilizada para este proyecto de estudio será del 90%, de acuerdo con datos observables y cuantificables para este parámetro en minas subterráneas similares.

3.2.2.6 Simulación económica con Montecarlo. Como se mencionó anteriormente, al no existir certeza total con frecuencia la incertidumbre es significativa, como ocurre para cada uno de los casos que se van a generar por la metodología HoV, es necesario cuantificar los factores de incertidumbre y riesgos e introducirlos de manera formal, convirtiéndose así el análisis de selección de cut off y ritmo de producción óptimos, en un análisis probabilístico o también denominado análisis estocástico.

Este análisis de riesgo se basará en el empleo del método de Montecarlo, para la simulación conceptual que requerirá un número elevado de cálculos iterativos de los casos óptimos seleccionados, esto con el fin de obtener la función de densidad de probabilidad de la variable en análisis que en este caso será la TIR (%) y el llamado perfil de riesgo de esta misma variable que expresara la probabilidad de que el indicador TIR supere el valor genérico del costo de oportunidad y la incertidumbre de cada caso.

Con estas mejoras metodológicas claramente definidas, es crucial establecer un proceso estructurado para su implementación en la valorización del proyecto minero. A continuación, se detallan la secuencia que deben seguirse para aplicar efectivamente la metodología HoV mejorada, garantizando una evaluación exhaustiva y ajustada a las condiciones específicas del proyecto minero en estudio de la tesis.

- Definición de parámetros técnico-económicos.

- Generación de stopes en base a las dimensiones de los tajos de explotación ya definidos en el estudio geomecánico a nivel de factibilidad para el método de explotación Bench & Fill.
- Aplicación de Dilución interna y externas definidas entre los rangos operativos para el tipo de estructura en el método de Bench & Fill.
- Valorización de cada bloque de acuerdo con los parámetros económicos definidos.
- Cubicación de reservas seleccionadas para cada nivel de explotación con base en los modificadores operativos.
- Selección del nivel de explotación que genere el mayor VAN.
- Desde el paso a) hasta el paso f), se realizará el ejercicio contemplando distintos valores de cut off, tomando hasta 29 valores de cut off diferentes (valores de cut off que irán incrementándose en valores de 5.00 US\$/t, desde los 60 US\$/t hasta los 200 US\$/t).
- Elaboración del plan de producción para los 783 escenarios (basado en la combinación de los 29 valores de cut off y en 27 ritmos de producción, ritmos de producción que irán incrementándose en valores de 100tpd, desde las 1,000tpd hasta las 3,600tpd).
- Escalamiento de costos operativos OPEX para cada plan de producción.
- Escalamiento de costos de capital CAPEX para cada plan de producción.
- Se estimará el VAN para cada uno de los 783 escenarios considerando las combinaciones de los 27 ritmos de producción para cada uno de los 29 valores de cut off. De estos valores, se seleccionará el cut off que maximiza el VAN del proyecto y que sea robusto para el proyecto, con un análisis estratégico basado en sensibilidades de precio del Au.
- Seleccionado el cut off óptimo en el paso k), se analizarán los 27 ritmos de producción para dicho cut off y así determinar el o los ritmos de producción que genere mayor VAN al proyecto.

- Para la confirmación del ritmo de producción que genere mayor VAN al proyecto se realizará un análisis estratégico basado en indicadores técnicos-económicos como vida de mina del proyecto, VAN, TIR, Perfiles de Riesgo, etc.

La metodología HoV tradicional y mejorada, se sustenta en la calidad del levantamiento de información. Además, es esencial lograr un enfoque integral y riguroso, donde cada etapa del proceso contribuye de manera coherente a la etapa siguiente. La metodología no solo guía el diseño de investigación, sino que también se adapta en función de los datos recopilados. De esta manera, se asegura que las decisiones metodológicas estén informadas por un entendimiento profundo de las condiciones específicas del proyecto, lo que permite abordar de manera efectiva los desafíos y oportunidades que presenta el entorno del proyecto minero subterráneo en estudio.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

La tesis está enfocada en un proyecto minero subterráneo de Au que se explotara mineral mediante el método de taladros largos en su variante Bench and Fill. En el marco de este proyecto, se realizará un análisis comparativo de diversos escenarios de valorización utilizando la metodología Hill of Value y su versión mejorada, con el objetivo de maximizar el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto.

El análisis inicia con la definición del caso base, el cual se fundamenta en los parámetros establecidos en el estudio de prefactibilidad, incluyendo el valor de cut off y el ritmo de producción. Este caso sirve como referencia para evaluar las mejoras y optimizaciones propuestas por las metodologías HoV tradicional y HoV mejorado. Se examinaron 29 valores de cut off y 27 ritmos de producción para identificar la combinación optima que maximiza el VAN.

La metodología HoV mejorada integra consideraciones adicionales como la capacidad variable en el tiempo, la ley media variable, perfil de inversiones y análisis de riesgo. Estas modificaciones permiten una estimación más precisa del VAN y una optimización más efectiva de la valorización del proyecto.

Los resultados obtenidos a partir de este análisis proporcionan una base técnica sólida para la toma de decisiones estratégicas en la planificación y desarrollo de operaciones mineras subterráneas, garantizando una explotación eficiente y la maximización del valor del proyecto.

A partir de los objetivos previamente descritos, se procede a definir la metodología y los casos específicos que serán evaluados en la tesis. El enfoque principal es examinar el impacto de diferentes combinaciones de cut off y ritmos de producción en la valorización de un proyecto minero subterráneo de Au, explotado mediante el método de Taladros Largos en su variante Bench and Fill. Para ello, se han seleccionado y definido los siguientes casos:

Definición de Caso Base:

El escenario denominado como caso base será el escenario con valor de cut off y ritmo de producción definido en el estudio de prefactibilidad.

Casos de optimización:

Comparativo metodología Hill of Value tradicional vs Caso Hill of Value mejorado: Con el fin de explorar y contrastar las dos variantes metodológicas de optimización, se establece lo siguiente:

- **Caso Hill of Value:**

Para cada uno de los diferentes 29 cut offs, el VAN es estimado para diferentes para distintos ritmos de producción. Para ambos proyectos se utilizarán 27 ritmos de producción para cada valor de cut off. El escenario con la combinación de cut off y ritmo de producción que genere el valor máximo de VAN será seleccionado.

- **Caso Hill of Value mejorado:**

Corresponderá a realizar la metodología del Hill of Value mencionada anteriormente, considerando mejoras en la estimación del VAN, las cuales se basan en tomar en cuenta la capacidad variable en el tiempo, ley media variable, perfil de inversiones en el tiempo, footprint suavizado y recuperación minera menor a 100% y análisis de riesgo. Así, con diferentes 29 cut offs, el VAN es estimado para diferentes ritmos de producción. Para ambos proyectos se utilizarán 27 ritmos de producción para cada valor de cut off. El ritmo de producción que tiene el valor máximo de VAN es seleccionado.

Este enfoque permitirá desarrollar los escenarios específicos bajo los casos comparativos de optimización.

Primero, se describe el caso Base, que representa la configuración inicial del proyecto conforme al estudio de prefactibilidad.

Luego, se introducen los enfoques comparativos: Hill of Value Tradicional y Hill of Value mejorado.

Para cada uno de estos métodos, se llevará a cabo una evaluación exhaustiva de diferente combinación de cut off y ritmos de producción, buscando optimizar el VAN. Este análisis permitirá comparar el rendimiento de la cada metodología y determinar el impacto de las mejoras propuestas en la maximización del VAN del proyecto. Finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos evaluando la rentabilidad y viabilidad del proyecto minero subterráneo para cada caso.

4.1 Resultados del caso Base

El caso Base ha sido evaluado en estudios de ingeniería precedentes y tomaron el modelo del breakeven cut off para realizar el plan de minado y la evaluación económica. La Tabla 17 detalla los costos unitarios estimados en el estudio de prefactibilidad del proyecto y que serán aplicables a la operación, estos incluyen exploración, explotación, procesamiento, servicios, gastos administrativos, etc. A partir de esta base, los costos unitarios fueron distribuidos para estimar el cut off marginal y cut off económico, cuyos valores también se presentan la Tabla 16.

A partir de la estimación del cut off económico, el estudio de prefactibilidad determinó un valor de breakeven cut off de 115.26 US\$/t, y en base a este valor de corte se estimaron 4,150,405 toneladas de reservas minerales con ley media de Au y Ag de 3.01g/t y 3.31 Oz/t respectivamente, lo cual valorizaba un NSR medio de las reservas de 188 US\$/t.

Tabla 16*Cut off marginal y cut off económico, Caso Base*

PROCESO	CUT OFF MARGINAL (US\$/t)	CUT OFF ECONÓMICO (US\$/t)
1. Mina	33.30	42.02
1.1 Desarrollo	-	1.48
1.2 Preparación	15.18	15.18
1.3 Explotación	12.49	12.49
1.4 Mantto Mina	2.59	5.10
1.5 Servicios Auxiliares Mina	2.54	5.33
1.6 Supervisión y Administración Mina	0.50	2.44
2. Planta	37.10	37.10
2.1 Fundición	0.67	0.67
2.2 Mantenimiento Planta	5.96	5.96
2.3 Planta Cianuración ADR	6.00	6.00
2.4 Planta Concentradora	20.05	20.05
2.5 Servicios Auxiliares Planta	1.74	1.74
2.6 Supervisión y Administración Planta	2.68	2.68
3. Servicios	-	32.54
3.1 Administración de unidad	-	8.84
3.2 Generación y Transmisión de energía	-	0.70
3.3 Gerencia de unidad	-	7.90
3.4 Maquila y Otros	-	0.06
3.5 Medio Ambiente	-	1.25
3.6 Recursos Humanos	-	2.30
3.7 Relaciones Comunitarias	-	1.79
3.8 Seguridad Minera	-	0.66
3.9 Servicios Técnicos	-	7.63
3.10 Talleres y Administración Mantenimiento	-	1.41
4. Sustaining Capex	-	3.60
Total	70.40	115.26

Fuente: Elaboración propia

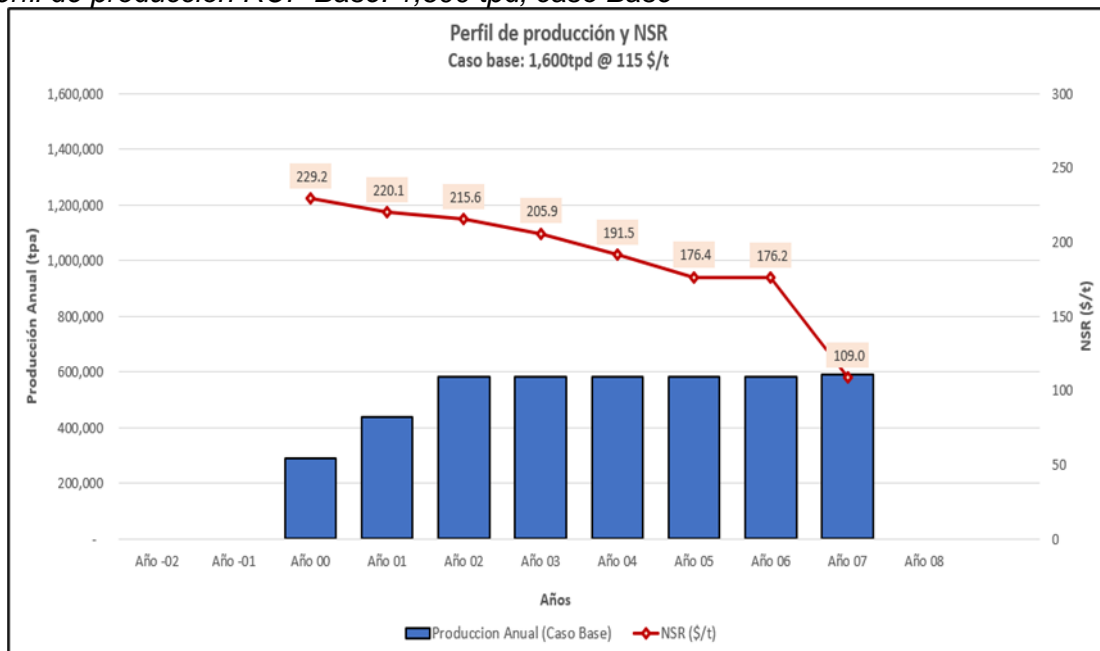
Las reservas estimadas del estudio de prefactibilidad determinan el ritmo de producción diaria mediante la fórmula de Taylor, el ritmo de producción para la explotación del yacimiento es:

$$Produccion\ diaria = 0.017 \times \sqrt[4]{4,150,405^3} = 1,563\ tpd \approx 1,600\ tpd$$

En base al resultado anterior, el plan de minado fue realizado a un ritmo de producción de 1,600 tpd, con un LOM de 7.8 años, tal como se muestra en la Figura 44. Finalmente, con una CAPEX de 177.4M US\$, la evaluación económica realizada en el estudio de factibilidad con una tasa de descuento de 10%, genero un VAN de 24.47M US\$, IVAN de 0.14 y una TIR de 13.07%.

Figura 44

Perfil de producción ROP Base: 1,600 tpd, caso Base



Fuente: Elaboración propia

El caso base servirá como referencia para comparar los resultados de los casos de optimización. El primer caso de optimización, denominado caso B, aplicara la metodología Hill of Value (HoV) para optimizar el VAN del proyecto. En este caso, se definirán las variables dependientes relacionadas con el cut off y el ritmo de producción para crear diferentes escenarios de optimización. Estos escenarios serán analizados para identificar las combinaciones de cut off y ritmos de producción que maximicen el VAN para dicho caso.

Siguiendo el caso B, el caso C utilizara una versión mejorada de la metodología Hill of Value (HoV). Este enfoque refinado incluye ajustes adicionales y consideraciones más detalladas para obtener valores ajustados del VAN optimizado. La metodología HoV

mejorada permitirá una evaluación más precisa y exhaustiva de las variables optimizadas para maximizar el VAN del proyecto.

4.2 Resultados del caso B – Hill of Value

4.2.1 Definición de variables para optimización del caso B

Las variables dependientes expuestas cut off y ritmo de producción para los escenarios de optimización son definidas a continuación:

Se definen 29 valores de cut offs que irán incrementándose en valores de 5.00 US\$/t serán denominados como: CO1, CO2, CO3, ... CO29.

Donde:

CO1: Cut off 1 correspondiente al valor de corte económico de 60 US\$/t.

CO2: Cut off 2 correspondiente al valor de corte económico de 65 US\$/t.

CO3: Cut off 3 correspondiente al valor de corte económico de 70 US\$/t.

CO4: Cut off 4 correspondiente al valor de corte económico de 75 US\$/t.

CO5: Cut off 5 correspondiente al valor de corte económico de 80 US\$/t.

CO6: Cut off 6 correspondiente al valor de corte económico de 85 US\$/t.

CO7: Cut off 7 correspondiente al valor de corte económico de 90 US\$/t.

CO8: Cut off 8 correspondiente al valor de corte económico de 95 US\$/t.

CO9: Cut off 9 correspondiente al valor de corte económico de 100 US\$/t.

CO10: Cut off 10 correspondiente al valor de corte económico de 105 US\$/t.

CO11: Cut off 11 correspondiente al valor de corte económico de 110 US\$/t.

CO12: Cut off 12 correspondiente al valor de corte económico de 115 US\$/t.

CO13: Cut off 13 correspondiente al valor de corte económico de 120 US\$/t.

CO14: Cut off 14 correspondiente al valor de corte económico de 125 US\$/t.

CO15: Cut off 15 correspondiente al valor de corte económico de 130 US\$/t.

CO16: Cut off 16 correspondiente al valor de corte económico de 135 US\$/t.

CO17: Cut off 17 correspondiente al valor de corte económico de 140 US\$/t.

CO18: Cut off 18 correspondiente al valor de corte económico de 145 US\$/t.

CO19: Cut off 19 correspondiente al valor de corte económico de 150 US\$/t.

CO20: Cut off 20 correspondiente al valor de corte económico de 155 US\$/t.

CO21: Cut off 21 correspondiente al valor de corte económico de 160 US\$/t.

CO22: Cut off 22 correspondiente al valor de corte económico de 165 US\$/t.

CO23: Cut off 23 correspondiente al valor de corte económico de 170 US\$/t.

CO24: Cut off 24 correspondiente al valor de corte económico de 175 US\$/t.

CO25: Cut off 25 correspondiente al valor de corte económico de 180 US\$/t.

CO26: Cut off 26 correspondiente al valor de corte económico de 185 US\$/t.

CO27: Cut off 27 correspondiente al valor de corte económico de 190 US\$/t.

CO28: Cut off 28 correspondiente al valor de corte económico de 195 US\$/t.

CO29: Cut off 29 correspondiente al valor de corte económico de 200 US\$/t.

Se definen 27 valores para los ritmos de producción que irán incrementándose en valores de 100 tpd y serán denominados como: ROP1, ROP2, ROP3, ...ROP27.

Donde:

ROP1: Ritmo de producción 1 correspondiente al valor de 1,000 tpd.

ROP2: Ritmo de producción 2 correspondiente al valor de 1,100 tpd.

ROP3: Ritmo de producción 3 correspondiente al valor de 1,200 tpd.

ROP4: Ritmo de producción 4 correspondiente al valor de 1,300 tpd.

ROP5: Ritmo de producción 5 correspondiente al valor de 1,400 tpd.

ROP6: Ritmo de producción 6 correspondiente al valor de 1,500 tpd.

ROP7: Ritmo de producción 7 correspondiente al valor de 1,600 tpd.

ROP8: Ritmo de producción 8 correspondiente al valor de 1,700 tpd.

ROP9: Ritmo de producción 9 correspondiente al valor de 1,800 tpd.

ROP10: Ritmo de producción 10 correspondiente al valor de 1,900 tpd.

ROP11: Ritmo de producción 11 correspondiente al valor de 2,000 tpd.

ROP12: Ritmo de producción 12 correspondiente al valor de 2,100 tpd.

ROP13: Ritmo de producción 13 correspondiente al valor de 2,200 tpd.

ROP14: Ritmo de producción 14 correspondiente al valor de 2,300 tpd.

ROP15: Ritmo de producción 15 correspondiente al valor de 2,400 tpd.

ROP16: Ritmo de producción 16 correspondiente al valor de 2,500 tpd.

ROP17: Ritmo de producción 17 correspondiente al valor de 2,600 tpd.

ROP18: Ritmo de producción 18 correspondiente al valor de 2,700 tpd.

ROP19: Ritmo de producción 19 correspondiente al valor de 2,800 tpd.

ROP20: Ritmo de producción 20 correspondiente al valor de 2,900 tpd.

ROP21: Ritmo de producción 21 correspondiente al valor de 3,000 tpd.

ROP22: Ritmo de producción 22 correspondiente al valor de 3,100 tpd.

ROP23: Ritmo de producción 23 correspondiente al valor de 3,200 tpd.

ROP24: Ritmo de producción 24 correspondiente al valor de 3,300 tpd.

ROP25: Ritmo de producción 25 correspondiente al valor de 3,400 tpd.

ROP26: Ritmo de producción 26 correspondiente al valor de 3,500 tpd.

ROP27: Ritmo de producción 27 correspondiente al valor de 3,600 tpd.

4.2.2 Metodología Hill of Value para el caso B

- Los cut off's destinados a optimizar el VAN evaluando las reservas para los diferentes cut off's CO1, CO2, CO3, ..., CO29 por la metodología Hill of Value serán definidos como CO1B, CO2B, CO3B, ..., CO29B.
- Los ritmos de producción que buscarán optimizar el VAN evaluando las reservas para los diferentes ritmos de producción ROP1, ROP2, ROP3, ..., ROP27 por la metodología Hill of Value; serán definidos como ROP1B, ROP2B, ROP3B, ..., ROP27B. En conjunto con los cut off's, esto dará lugar a un total de 783 combinaciones de escenarios.
- El plan minero simulado para los 27 distintos ritmos de producción que maximiza el VAN con el cut off de valor de CO1B se definirá como LOM1B.
- La evaluación económica para el plan minero LOM1B se definirá como VAN1B y se estimará con una tasa de descuento de 10%.

4.2.3 Selección de reservas para el caso B

Para la selección de reservas son aplicados los diferentes valores de cut offs ya mencionados. Los resultados de la selección de reservas se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17*Reservas seleccionadas para valores de cut off, caso B*

Estimación	Cut off (US\$/t)	Reservas (t)	Ley media Au (gr/t)	Ley media Ag (Oz/t)	NSR media (US\$/t)
01	60	6,589,506	1.54	1.73	80.02
02	65	6,402,247	1.63	1.82	87.16
03	70	6,146,290	1.77	1.97	99.03
04	75	5,985,550	1.85	2.05	106.51
05	80	5,780,192	1.98	2.18	118.12
06	85	5,654,195	2.05	2.25	125.05
07	90	5,451,703	2.18	2.38	138.09
08	95	5,331,189	2.26	2.45	136.63
09	100	5,146,166	2.38	2.60	145.14
10	105	5,035,350	2.46	2.66	149.91
11	110	4,862,699	2.59	2.80	158.56
12	115	4,765,535	2.66	2.86	163.08
13	120	4,624,077	2.77	2.99	171.02
14	125	4,521,782	2.86	3.08	176.55
15	130	4,412,318	2.95	3.17	182.73
16	135	4,327,841	3.02	3.24	187.24
17	140	4,219,234	3.12	3.35	194.21
18	145	4,134,161	3.19	3.41	199.01
19	150	4,023,358	3.30	3.53	206.23
20	155	3,944,206	3.37	3.59	210.97
21	160	3,833,244	3.49	3.71	219.07
22	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13
23	170	3,670,318	3.57	3.79	224.48
24	175	3,607,557	3.59	3.81	225.84
25	180	3,528,618	3.61	3.83	227.20
26	185	3,472,312	3.63	3.85	228.56
27	190	3,389,359	3.65	3.87	229.92
28	195	3,340,304	3.67	3.89	231.28
29	200	3,260,807	3.69	3.91	232.64

Fuente: Elaboración propia

Cada uno de estos 29 escenarios representan proyectos mineros de tamaños diferentes. Si comparamos los casos extremos de la Tabla 18, las reservas seleccionadas para el escenario 1 (valor de cut off de 60 US\$/t) y escenario 29 (valor de cut off de 200 US\$/t), son de 6,589,506t y 3,260,807t respectivamente.

La Figura 45 muestra la curva tonelaje de reservas – cut off para el caso B, la cual permite visualizar el tonelaje de reservas y el NSR medio del depósito en función al valor de cut off que se seleccione.

Figura 45

Curva tonelaje de reservas vs cut off, caso B

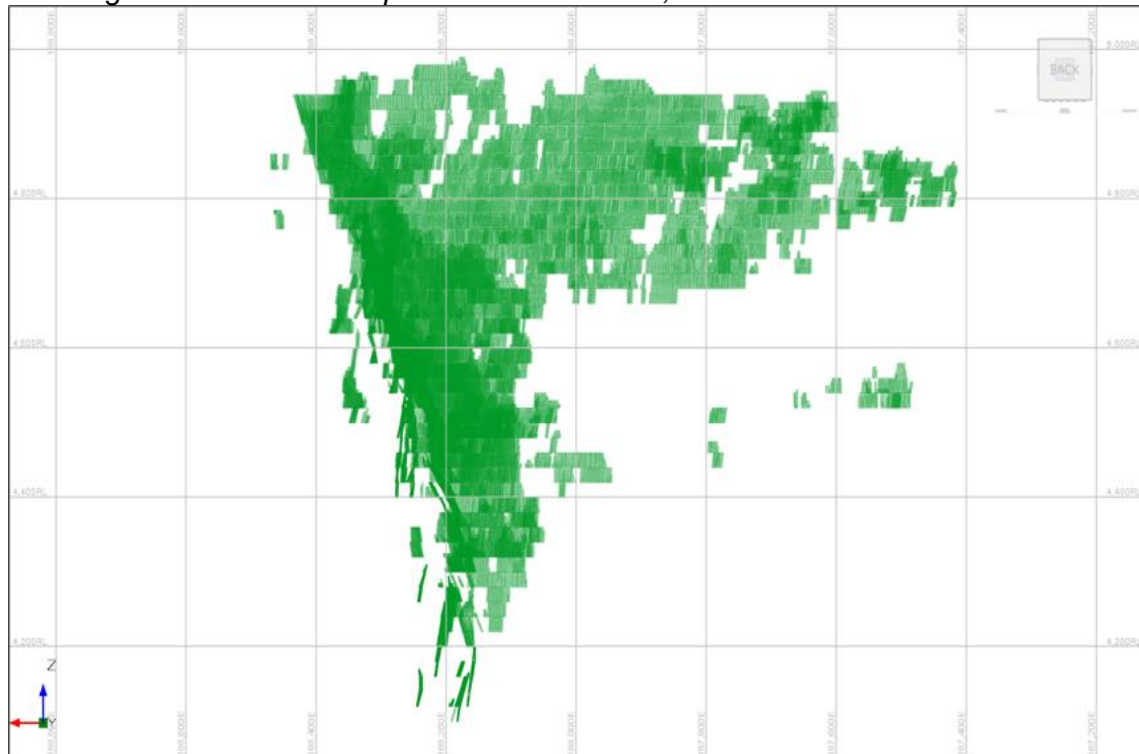


Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 46 y 47 representan las reservas de estos escenarios mencionados, en donde la grilla de 200m x 200m se representa de color plomo, mientras que los bloques de color verde corresponden a las reservas.

Figura 46

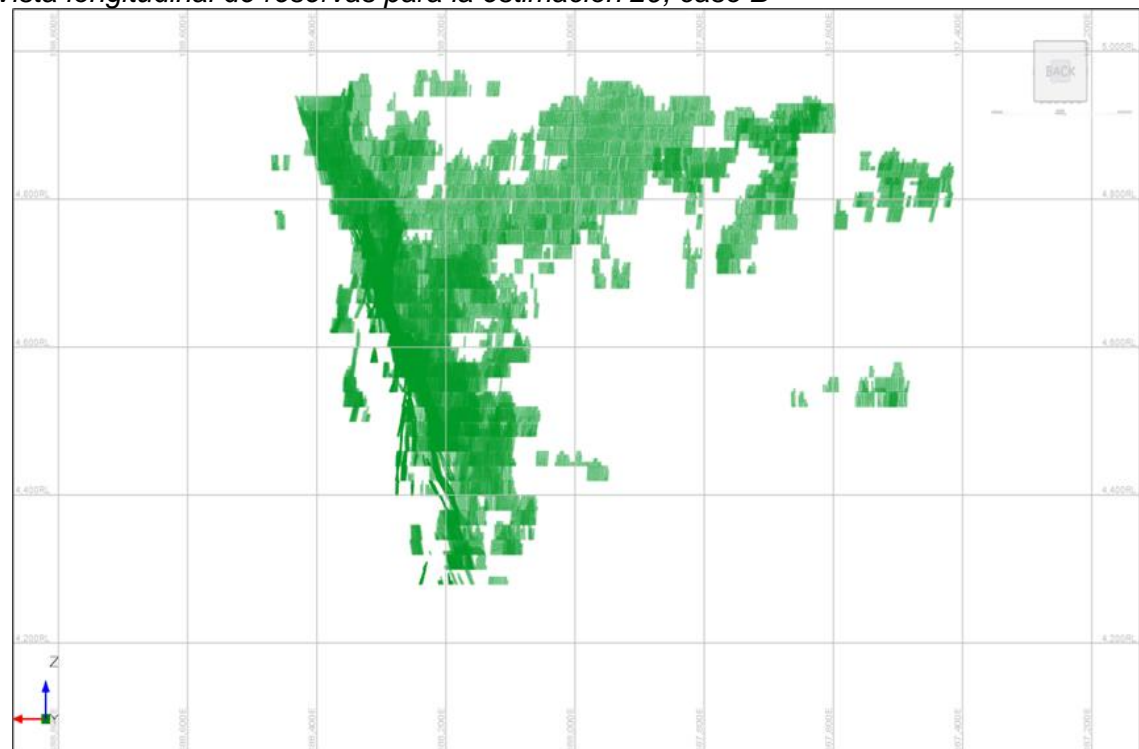
Vista longitudinal de reservas para la estimación 01, caso B



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

Vista longitudinal de reservas para la estimación 29, caso B

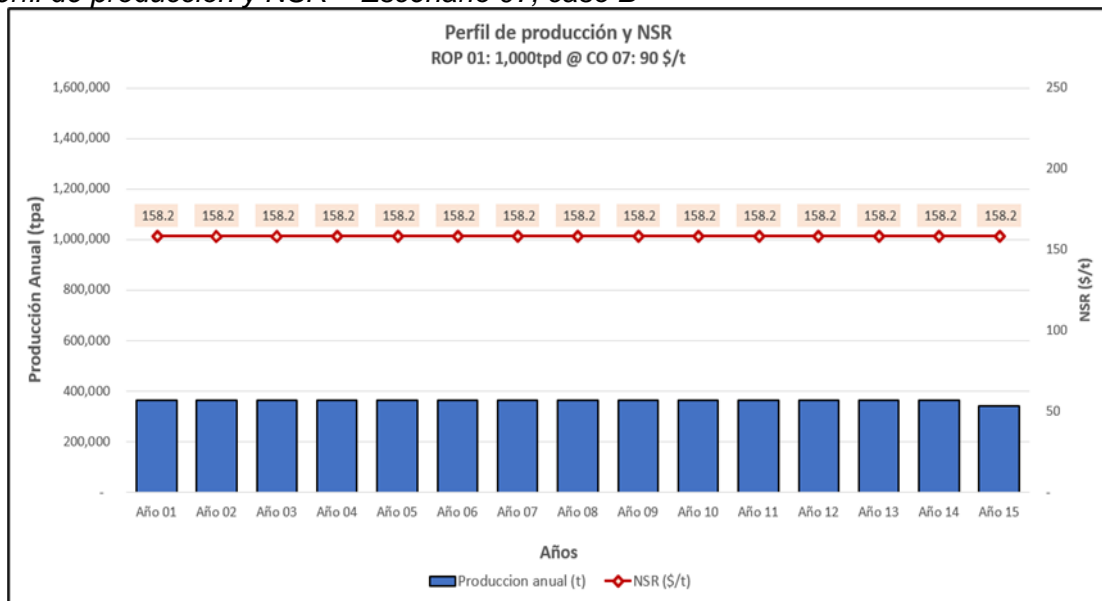


Fuente: Elaboración propia

Como parte del proceso fue necesario realizar para cada escenario perfiles de producción como se mencionó en capítulos anteriores basados en ramp-ups y leyes variables según la secuencia de explotación; como también los perfiles de inversión para CAPEX, Sustaining CAPEX Mina, Sustaining CAPEX Planta, etc., la Figura 48 y 49 muestran un escenario ejemplo de los 783 considerados para el análisis realizado.

Figura 48

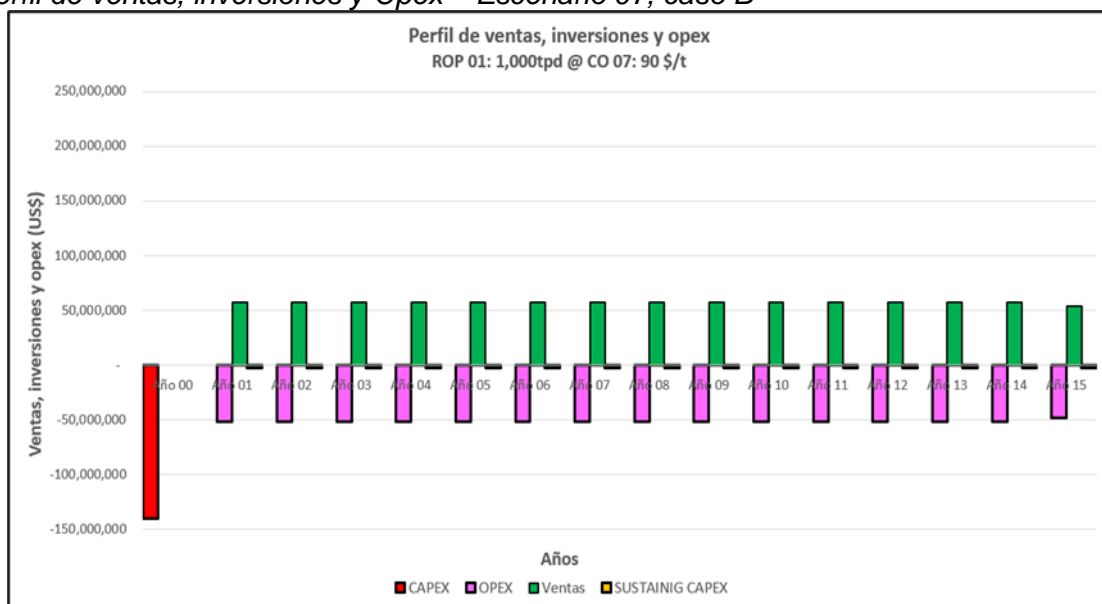
Perfil de producción y NSR – Escenario 07, caso B



Fuente: Elaboración propia

Figura 49

Perfil de ventas, inversiones y Opex – Escenario 07, caso B



Fuente: Elaboración propia

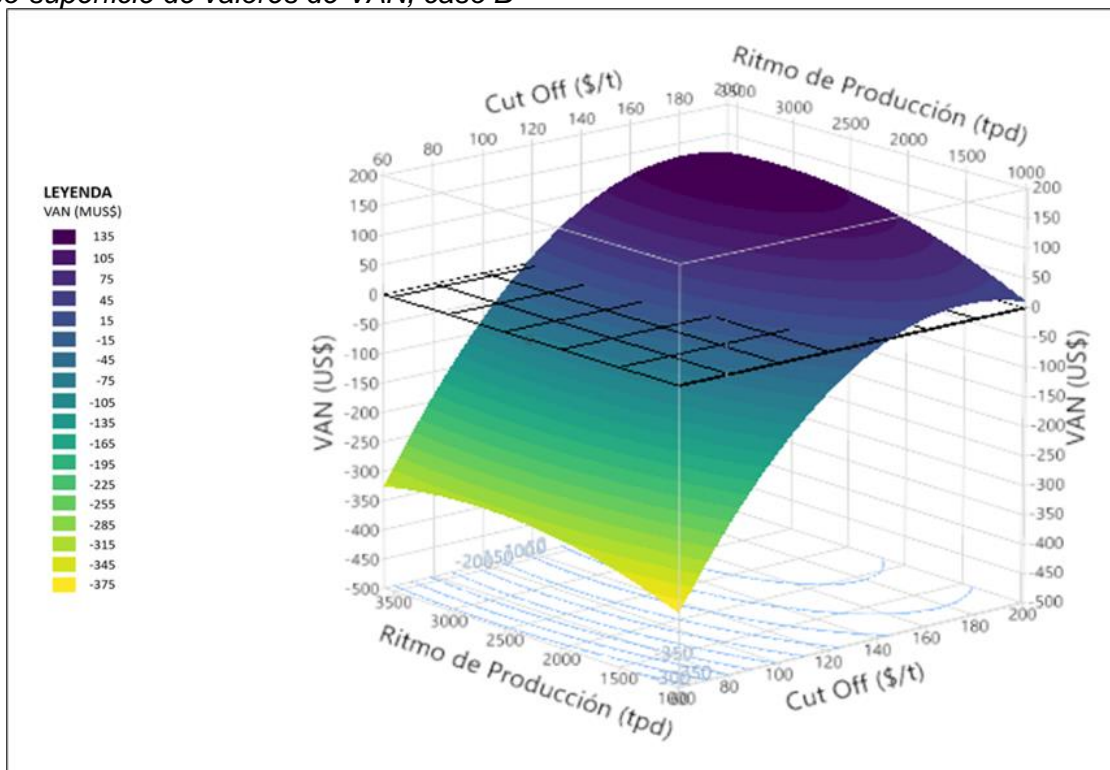
4.2.4 Aplicación del Hill of Value

La Figura 50 muestra las dos variables dependientes de optimización; en el eje “x” indica el ritmo de producción diario (valores que van desde 1,000 tpd, 1,100 tpd, 1,200 tpd, hasta 3,600 tpd), en el eje “y” indica el valor de cada cut off relacionado con su respectivo escenario (valores que van desde 60 US\$/t, 65 US\$/t, 70 US\$/t hasta 200 US\$/t) y, por último, en el eje “z” se representa el Valor Actual Neto estimado para cada proyecto.

Para generar la Iso-superficie de valores de VAN con el fin de obtener el valor Hill of Value, ha sido necesario plotear los valores de VAN producto de la evaluación económica de cada uno de los 783 escenarios (que se muestran en la Tabla 19 de doble entrada) en la plataforma del software JMP Statistical Discovery. La Iso-superficie de valores de VAN para el caso B es presentado en la Figura 50.

Figura 50

Iso-superficie de valores de VAN, caso B



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18

Resumen de valores VAN (M US\$), 783 escenarios, caso B

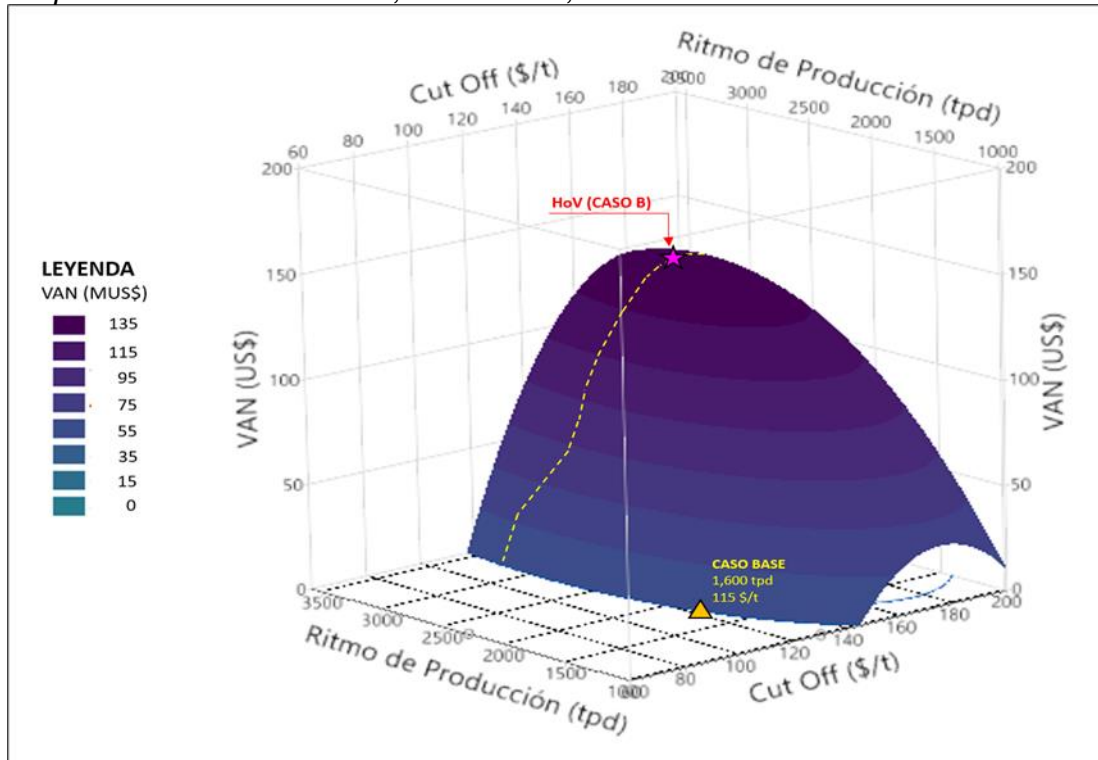
ROP (tpd)	CUT OFF (US\$/t)																												
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
3,600	-343.8	-303.9	-247.4	-213.7	-163.6	-135.2	-83.7	-93.4	-59.9	-44.9	-18.2	-5.4	17.2	31.8	47.6	58.1	75.0	85.3	101.1	110.3	126.1	132.7	126.9	124.7	120.7	118.8	114.1	112.8	108.1
3,500	-341.9	-306.1	-246.0	-212.5	-162.6	-134.3	-83.0	-92.7	-63.3	-43.9	-17.3	-4.6	18.0	32.6	48.3	58.8	75.6	85.9	101.6	110.8	127.4	134.0	128.3	126.0	122.0	120.2	115.5	114.2	109.6
3,400	-340.1	-304.5	-244.7	-211.3	-161.6	-133.4	-82.4	-92.0	-62.7	-47.5	-16.5	-3.7	18.7	33.3	48.9	59.4	76.2	86.4	102.0	111.1	127.7	134.8	129.6	127.4	123.4	121.6	116.9	115.6	111.0
3,300	-338.4	-303.0	-247.2	-210.1	-160.7	-132.7	-81.9	-91.4	-62.3	-47.0	-20.0	-3.0	19.4	33.9	49.5	60.0	76.7	86.8	102.4	111.5	128.0	135.0	130.3	128.6	124.7	122.9	118.2	117.0	112.4
3,200	-336.7	-301.5	-246.1	-212.9	-159.9	-132.0	-81.4	-90.8	-61.8	-46.7	-19.8	-6.7	20.1	34.5	50.1	60.5	77.1	87.3	102.8	111.8	128.2	135.2	130.5	128.9	125.7	124.2	119.5	118.3	113.7
3,100	-335.2	-300.1	-245.0	-212.0	-162.9	-131.3	-81.0	-90.4	-61.5	-46.4	-19.7	-6.7	16.2	35.0	50.5	60.9	77.5	87.6	103.1	112.1	128.4	135.4	130.7	129.1	125.9	124.7	120.8	119.5	115.0
3,000	-336.9	-298.8	-244.1	-211.3	-162.5	-134.7	-80.8	-90.0	-61.3	-46.3	-19.6	-6.7	16.0	30.8	46.8	61.3	77.8	87.9	103.3	112.3	128.5	135.5	130.8	129.2	126.0	124.8	121.0	120.2	116.2
2,900	-335.4	-300.8	-243.2	-210.6	-162.1	-134.5	-84.5	-93.3	-61.1	-46.2	-19.6	-6.8	15.8	30.5	46.4	57.2	78.1	88.1	103.4	112.4	128.5	135.5	130.8	129.3	126.1	124.9	121.1	120.3	116.6
2,800	-334.0	-299.6	-245.6	-210.1	-161.9	-134.5	-84.8	-93.5	-64.6	-46.2	-19.8	-7.0	15.5	30.1	45.9	56.6	73.6	84.1	103.5	112.4	128.5	135.4	130.8	129.3	126.2	124.9	121.2	120.4	116.7
2,700	-332.7	-298.6	-245.0	-212.7	-161.8	-134.6	-85.2	-93.8	-65.1	-50.0	-20.1	-7.3	15.0	29.6	45.3	56.0	72.9	83.3	99.2	108.6	128.4	135.3	130.7	129.2	126.1	124.9	121.2	120.4	116.7
2,600	-331.5	-297.7	-244.5	-212.5	-164.9	-134.8	-85.8	-94.3	-65.7	-50.8	-24.1	-11.1	14.5	29.0	44.6	55.2	72.0	82.3	98.1	107.5	124.3	135.0	130.5	129.0	125.9	124.7	121.1	120.3	116.7
2,500	-333.1	-299.6	-244.2	-212.5	-165.3	-138.3	-86.5	-94.9	-66.5	-51.7	-25.2	-12.3	10.3	28.2	43.7	54.3	70.9	81.2	96.9	106.2	122.9	130.2	126.5	122.0	119.6	117.8	115.8	113.4	111.4
2,400	-332.0	-298.9	-244.1	-212.6	-165.9	-139.2	-90.7	-98.7	-67.5	-52.7	-26.5	-13.7	8.8	23.5	39.4	53.2	69.8	80.0	95.6	104.9	121.4	128.6	125.0	124.0	121.6	117.6	115.7	113.3	111.4
2,300	-331.2	-298.4	-246.7	-215.6	-166.6	-140.2	-92.2	-100.0	-71.7	-54.0	-27.9	-15.2	7.1	21.7	37.5	48.3	65.3	78.6	94.1	103.3	119.7	126.9	123.3	122.3	120.0	119.3	116.4	83.0	81.1
2,200	-332.7	-298.1	-247.0	-216.2	-170.2	-143.9	-93.9	-101.5	-73.5	-58.7	-26.4	-17.0	5.1	19.6	35.3	46.0	62.9	73.4	89.4	101.6	117.9	125.0	121.5	120.5	118.2	117.6	114.7	114.4	111.6
2,100	-332.1	-300.1	-249.7	-217.0	-171.6	-145.6	-98.4	-103.4	-75.6	-60.9	-34.9	-22.1	0.3	17.4	32.9	43.5	60.2	70.7	86.6	96.1	112.9	122.9	119.5	118.5	116.3	115.6	112.8	112.6	109.8
2,000	-333.7	-300.2	-250.4	-220.3	-173.3	-147.6	-100.9	-108.1	-80.3	-63.4	-37.6	-24.9	-2.8	11.8	27.6	40.8	57.4	67.7	83.5	92.9	109.6	117.0	114.3	110.0	108.4	106.1	104.9	102.0	100.8
1,900	-333.3	-302.3	-251.4	-221.7	-177.5	-152.0	-103.9	-110.8	-83.4	-68.8	-42.9	-28.1	-6.2	8.2	23.9	34.6	51.5	64.5	80.1	89.4	105.9	113.3	110.6	110.2	108.5	106.3	104.9	103.0	100.8
1,800	-335.0	-302.8	-254.6	-225.4	-180.0	-154.9	-109.4	-116.0	-86.8	-72.4	-46.9	-34.2	-12.2	4.3	19.8	30.4	47.1	57.6	73.5	83.2	102.0	109.3	106.6	103.7	101.6	99.8	97.2	95.7	93.6
1,700	-335.0	-305.1	-256.3	-227.5	-184.7	-160.0	-113.4	-119.8	-92.8	-78.4	-51.2	-38.7	-17.0	-2.6	13.0	25.8	42.3	52.7	68.4	78.0	94.7	102.3	90.8	88.8	87.8	86.0	83.5	81.9	79.4
1,600	-336.7	-306.2	-259.8	-231.7	-188.1	-163.9	-119.8	-125.8	-97.5	-83.3	-58.2	-45.7	-22.3	-8.1	7.3	17.9	34.5	45.1	62.9	72.3	88.8	96.3	94.4	72.8	70.2	68.8	66.4	64.8	62.4
1,500	-338.5	-308.8	-263.6	-234.8	-192.1	-168.3	-125.1	-130.9	-104.6	-90.6	-64.1	-51.8	-30.5	-16.3	-0.8	11.5	27.9	38.3	54.1	63.7	80.5	89.8	78.5	76.9	74.4	73.0	70.1	68.8	66.9
1,400	-339.3	-311.6	-266.5	-239.7	-199.5	-176.3	-132.7	-138.2	-112.3	-97.0	-72.6	-60.3	-39.2	-23.6	-8.4	2.1	18.5	29.0	46.4	55.8	72.3	79.9	78.7	77.5	75.1	73.6	71.8	69.6	67.7
1,300	-341.3	-314.5	-271.0	-244.9	-205.9	-182.2	-141.0	-146.1	-119.5	-105.9	-81.8	-69.7	-47.5	-33.7	-18.6	-8.1	9.6	20.0	35.5	45.1	61.7	71.0	60.6	58.3	56.3	54.2	52.8	50.8	48.9
1,200	-344.1	-317.6	-276.7	-250.6	-212.9	-190.1	-150.1	-154.8	-129.0	-115.6	-92.0	-78.9	-58.5	-44.8	-29.9	-18.2	-2.3	8.1	23.6	33.2	50.9	58.5	57.8	49.4	47.7	45.3	43.0	41.0	39.7
1,100	-346.1	-320.9	-281.7	-256.8	-219.8	-198.7	-160.1	-164.4	-139.4	-126.4	-103.4	-90.7	-70.7	-57.3	-41.5	-31.2	-15.5	-5.2	10.2	20.8	37.0	44.6	35.8	33.4	31.8	29.9	27.1	26.3	25.4
1,000	-348.1	-324.9	-287.1	-264.2	-229.0	-208.8	-171.2	-175.1	-151.9	-138.5	-116.1	-104.8	-84.4	-71.3	-57.0	-45.9	-30.5	-20.4	-5.2	5.2	21.2	20.7	20.3	18.8	16.6	15.9	11.4	8.7	5.3

Fuente: Elaboración propia

La estrategia óptima para maximizar el valor de VAN, como se explicó en capítulos anteriores se basa en la búsqueda de la combinación de las variables cut off y el ritmo de producción, que puedan colocar el valor del proyecto en la cima del HoV.

Figura 51

Iso-superficie de valores VAN>0, Hill of Value, caso B



Fuente: Elaboración propia

Por ello, para la iso-superficie de valores de VAN que se muestra en la Figura 51 se muestra una serie de color amarillo que representarán los valores máximos de VAN para diferentes valores de las variables dependientes de cut off y ritmos de producción. Los valores óptimos de las variables dependientes que maximizan el VAN se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Variables seleccionadas para obtener HoV, caso B

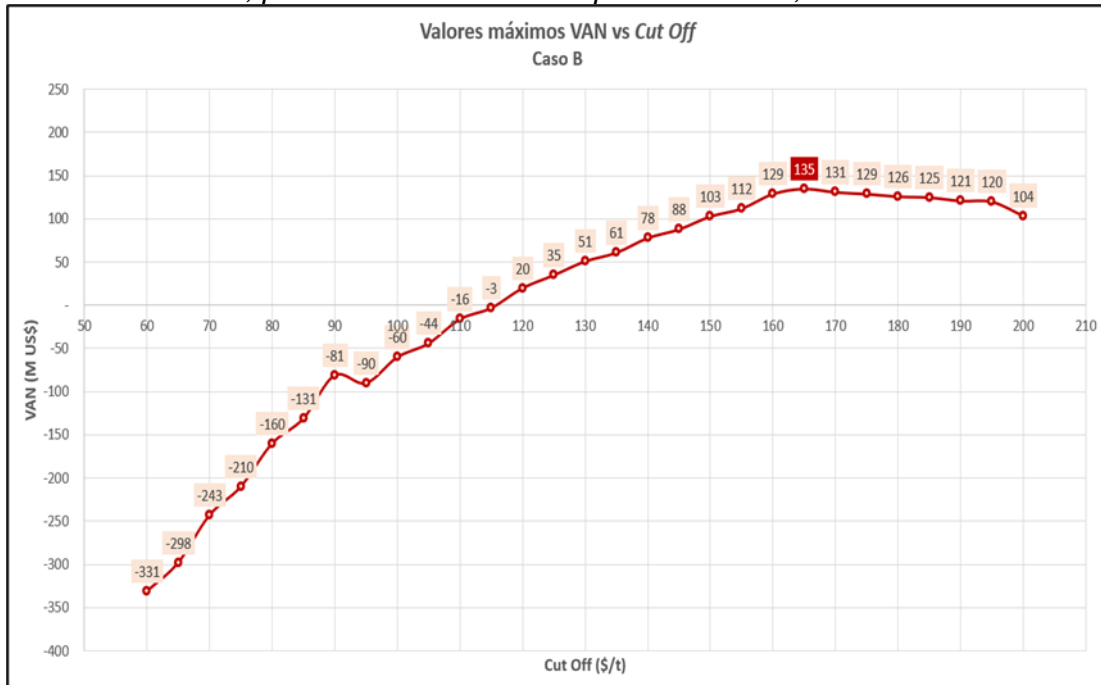
VARIABLE	UNIDAD	VALOR
Cut off (US\$/t)	CO22B	165 US\$/t
Ritmo de Producción (tpd)	ROP29B	2,900 tpd

Fuente: Elaboración propia

La Figura 52 representa los valores máximos de VAN para cada uno de los 29 cut offs mencionados anteriormente, incluidos los valores negativos.

Figura 52

Curva VAN vs cut off, para obtención de valor óptimo de cut off, caso B



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 20 detalla las características de cada uno de estos valores óptimos, se ha destacado en color magenta el escenario que representa un mayor VAN. Como se ha mencionado anteriormente, este valor de VAN nos permite obtener un orden de magnitud del valor óptimo del cut off que maximiza el valor económico del proyecto.

Tabla 20*Valores de VAN para diferentes cut off, caso B*

Estimación	Cut off (US\$/t)	Reservas (t)	Ley media Au (g/t)	Ley media Ag (Oz/t)	NSR media (US\$/t)	Ritmo de Producción (tpd)	LOM (años)	VAN (M US\$)	IVAN
1	60	6,589,506	1.54	1.73	80.02	2,600	6.9	-331	-1.43
2	65	6,402,247	1.63	1.82	87.16	2,600	6.7	-298	-1.29
3	70	6,146,290	1.77	1.97	99.03	2,900	5.9	-243	-0.99
4	75	5,985,550	1.85	2.05	106.51	2,800	5.9	-210	-0.88
5	80	5,780,192	1.98	2.18	118.12	3,200	5.0	-160	-0.62
6	85	5,654,195	2.05	2.25	125.05	3,100	5.0	-131	-0.52
7	90	5,451,703	2.18	2.38	138.09	3,000	5.0	-81	-0.32
8	95	5,331,189	2.26	2.45	136.63	3,000	4.0	-90	-0.36
9	100	5,146,166	2.38	2.60	145.14	3,600	4.0	-60	-0.22
10	105	5,035,350	2.46	2.66	149.91	3,500	4.0	-44	-0.16
11	110	4,862,699	2.59	2.80	158.56	3,400	4.0	-16	-0.06
12	115	4,765,535	2.66	2.86	163.08	3,300	4.0	-3	-0.01
13	120	4,624,077	2.77	2.99	171.02	3,200	4.0	20	0.08
14	125	4,521,782	2.86	3.08	176.55	3,100	4.0	35	0.14
15	130	4,412,318	2.95	3.17	182.73	3,100	4.0	51	0.20
16	135	4,327,841	3.02	3.24	187.24	3,000	4.0	61	0.25
17	140	4,219,234	3.12	3.35	194.21	2,900	4.0	78	0.32
18	145	4,134,161	3.19	3.41	199.01	2,900	3.9	88	0.36
19	150	4,023,358	3.30	3.53	206.23	2,900	3.8	103	0.42
20	155	3,944,206	3.37	3.59	210.97	2,900	3.7	112	0.46
21	160	3,833,244	3.49	3.71	219.07	2,900	3.6	129	0.53
22	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,900	3.6	135	0.55
23	170	3,670,318	3.57	3.79	224.48	2,900	3.5	131	0.54
24	175	3,607,557	3.59	3.81	225.84	2,900	3.4	129	0.53
25	180	3,528,618	3.61	3.83	227.20	2,900	3.3	126	0.52
26	185	3,472,312	3.63	3.85	228.56	2,900	3.3	125	0.51
27	190	3,389,359	3.65	3.87	229.92	2,800	3.3	121	0.50
28	195	3,340,304	3.67	3.89	231.28	2,800	3.3	120	0.50
29	200	3,260,807	3.69	3.91	232.64	2,700	3.3	117	0.50

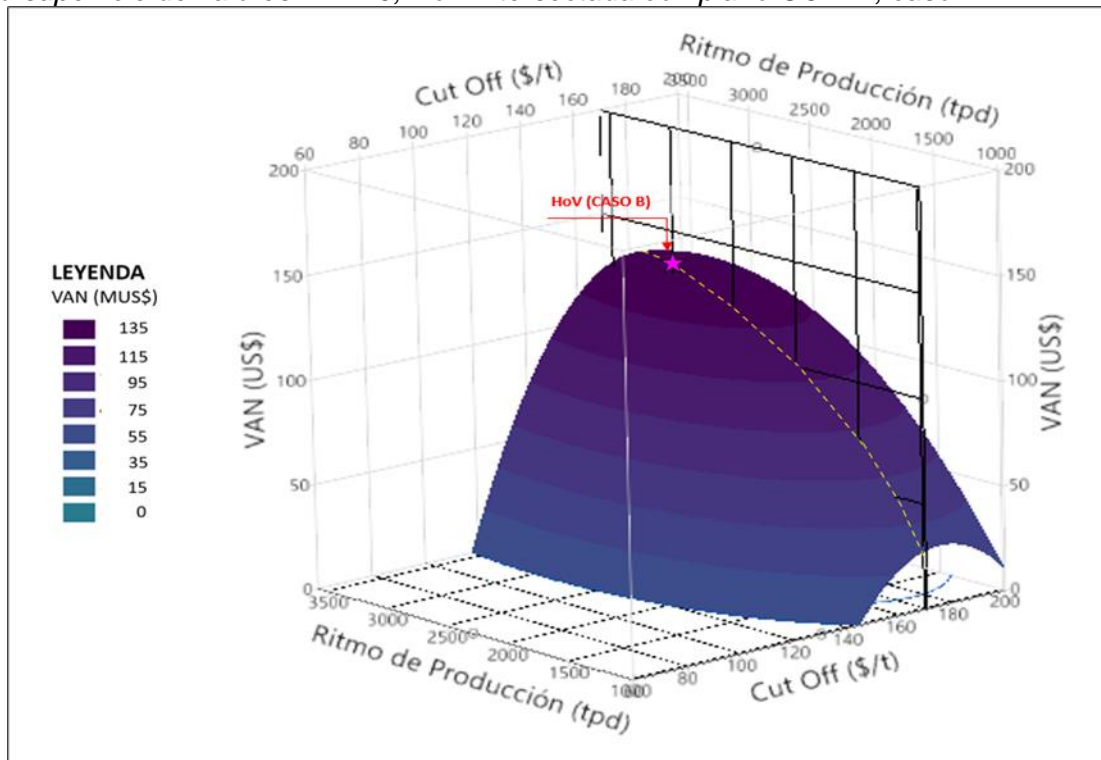
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, si intersectamos la superficie de contorno con el plano que genera el valor de CO22B (165 US\$/t).

$$P_{CO}: CO_B - 165 ; \forall ROP_B \in \{1,000; 3,600\}$$

Figura 53

Iso-superficie de valores VAN > 0, HoV intersectada con plano CO22B, caso B

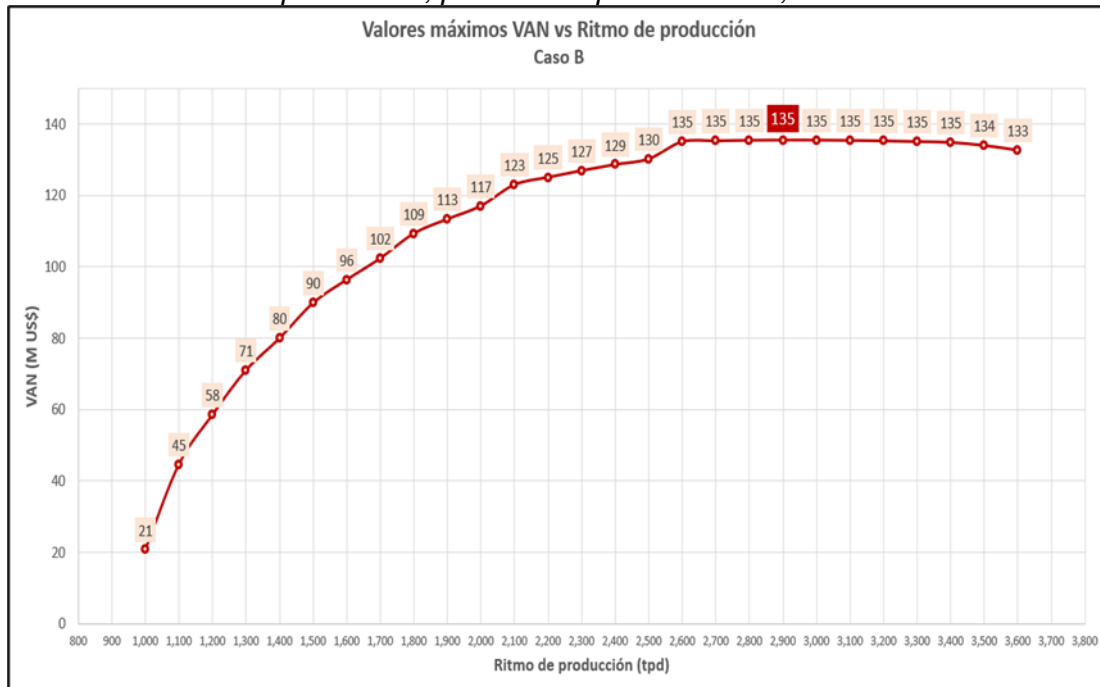


Fuente: Elaboración propia

Se obtendrán los puntos que maximizan el VAN para diferentes valores de ritmo de producción para el valor óptimo de cut off ya identificado. En la Figura 54, se representa la serie de puntos que detalla los valores máximos de VAN para cada uno de los 27 ritmos de producción para valor de cut off de 165 US\$/t, confirmando que el valor de ritmo de producción que maximiza el VAN del proyecto es de 2,900 tpd.

Figura 54

Curva VAN vs ritmo de producción, para valor óptimo de ROP, caso B



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 21 detalla las características de cada uno de los ritmos de producción. Se ha destacado de color verde el escenario que representa la maximización del VAN y de color verde claro los ROP's que dan robustez al proyecto debido a la meseta de valores de VAN que se muestra en la Figura 54. Como se ha mencionado anteriormente, este valor de VAN nos permite obtener un orden de magnitud del valor del ritmo de producción que maximiza el valor económico del proyecto con el cut off óptimo.

Cabe resaltar que el ritmo de producción resultante es mayor al valor que del caso de base, y esto es, porque la metodología del HoV tradicional impone que, desde el primer año de producción, el escenario evaluado se encuentre en su ritmo de producción máximo, lo que puede tenerse como consecuencia que el resultado de la metodología, entregue un ritmo de producción mayor ya que esto maximiza el VAN.

Tabla 21*Valores de VAN para diferentes valores de ROP's para cut off óptimo, caso B*

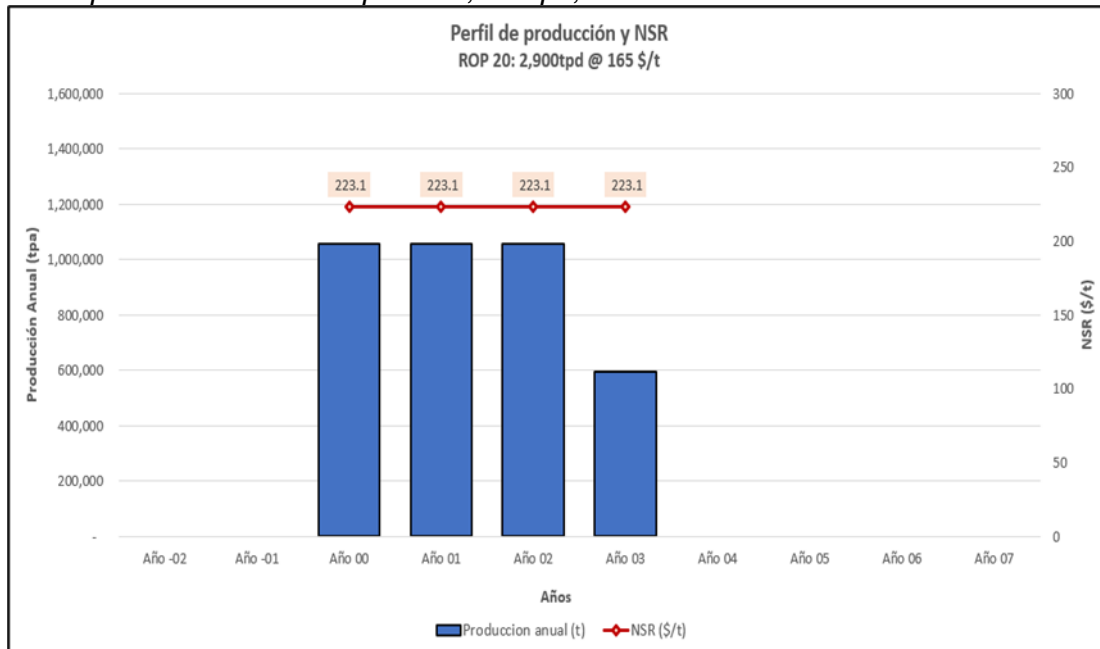
Estimación	Cut off (US\$/t)	Reservas (t)	Ley media Au (g/t)	Ley media Ag (Oz/t)	NSR media (US\$/t)	Ritmo de Producción (tpd)	LOM (años)	VAN (M US\$)	IVAN
1	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,000	10.3	20.70	0.15
2	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,100	9.4	44.58	0.30
3	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,200	8.6	58.47	0.38
4	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,300	7.9	70.95	0.44
5	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,400	7.4	79.91	0.48
6	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,500	6.9	89.82	0.52
7	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,600	6.5	96.31	0.54
8	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,700	6.1	102.30	0.55
9	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,800	5.7	109.28	0.57
10	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	1,900	5.4	113.31	0.58
11	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,000	5.2	117.02	0.58
12	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,100	4.9	122.95	0.60
13	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,200	4.7	125.03	0.59
14	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,300	4.5	126.91	0.59
15	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,400	4.3	128.62	0.58
16	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,500	4.1	130.18	0.58
17	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,600	4.0	135.00	0.58
18	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,700	3.8	135.26	0.57
19	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,800	3.7	135.42	0.56
20	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	2,900	3.6	135.48	0.55
21	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,000	3.4	135.47	0.54
22	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,100	3.3	135.38	0.53
23	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,200	3.2	135.24	0.53
24	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,300	3.1	135.04	0.52
25	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,400	3.0	134.81	0.51
26	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,500	3.0	133.96	0.50
27	165	3,769,495	3.55	3.77	223.13	3,600	2.9	132.66	0.48

Fuente: Elaboración propia

Añadir que si bien, se genera una meseta en la cual se podría elegir un ritmo de producción entre un rango de 2,600 tpd a 3,300 tpd, debido a que el valor de VAN varia en $\pm 1\%$, la posible elección de un ritmo de producción de 2,600 tpd traería como consecuencia aumentar la vida de la mina en 0.4 años, pero reduciendo el aporte de finos anuales de Au y Ag, por otro lado, elegir ritmos de producción mayores, tal como 3,300 tpd generaría que se reduzca la vida de la mina a 3.1 años que son inaceptables para este proyecto en estudio.

Figura 55

Perfil de producción ROP24 óptimo: 2,900 tpd, caso B



Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

Indicadores financieros para ROP y cut off óptimo, caso B

Ritmo de Producción (tpd)	Cut off (US\$/t)	LOM (años)	CAPEX Total (M US\$)	VAN (M US\$)	IVAN	TIR
2,900	165	3.6	261.7	135.48	0.55	36.4%

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el escenario con cut off de 165 US\$/t y ritmo de producción 2,900 tpd sería la alternativa más atractiva para la metodología tradicional, ya que estas variables generan un VAN de 135.48M US\$ y una rentabilidad de 36.4%, representando una mejoría económica de 400% (~108M US\$) con respecto al caso base (VAN: 27M US\$) y volviendo más atractivo el proyecto.

4.3 Resultados del caso C – Hill of Value mejorado

4.3.1 Definición de variables para optimización del caso C

Las variables dependientes expuestas cut off y ritmo de producción para los escenarios de optimización son definidas a continuación:

Se definen 29 valores de cut off's que irán incrementándose en valores de 5.00 US\$/t serán denominados como: CO1, CO2, CO3, ... CO29.

Donde:

- CO1: Cut off 1 correspondiente al valor de corte económico de 60 US\$/t.
- CO2: Cut off 2 correspondiente al valor de corte económico de 65 US\$/t.
- CO3: Cut off 3 correspondiente al valor de corte económico de 70 US\$/t.
- CO4: Cut off 4 correspondiente al valor de corte económico de 75 US\$/t.
- CO5: Cut off 5 correspondiente al valor de corte económico de 80 US\$/t.
- CO6: Cut off 6 correspondiente al valor de corte económico de 85 US\$/t.
- CO7: Cut off 7 correspondiente al valor de corte económico de 90 US\$/t.
- CO8: Cut off 8 correspondiente al valor de corte económico de 95 US\$/t.
- CO9: Cut off 9 correspondiente al valor de corte económico de 100 US\$/t.
- CO10: Cut off 10 correspondiente al valor de corte económico de 105 US\$/t.
- CO11: Cut off 11 correspondiente al valor de corte económico de 110 US\$/t.
- CO12: Cut off 12 correspondiente al valor de corte económico de 115 US\$/t.
- CO13: Cut off 13 correspondiente al valor de corte económico de 120 US\$/t.
- CO14: Cut off 14 correspondiente al valor de corte económico de 125 US\$/t.
- CO15: Cut off 15 correspondiente al valor de corte económico de 130 US\$/t.
- CO16: Cut off 16 correspondiente al valor de corte económico de 135 US\$/t.
- CO17: Cut off 17 correspondiente al valor de corte económico de 140 US\$/t.
- CO18: Cut off 18 correspondiente al valor de corte económico de 145 US\$/t.
- CO19: Cut off 19 correspondiente al valor de corte económico de 150 US\$/t.
- CO20: Cut off 20 correspondiente al valor de corte económico de 155 US\$/t.
- CO21: Cut off 21 correspondiente al valor de corte económico de 160 US\$/t.
- CO22: Cut off 22 correspondiente al valor de corte económico de 165 US\$/t.
- CO23: Cut off 23 correspondiente al valor de corte económico de 170 US\$/t.
- CO24: Cut off 24 correspondiente al valor de corte económico de 175 US\$/t.
- CO25: Cut off 25 correspondiente al valor de corte económico de 180 US\$/t.
- CO26: Cut off 26 correspondiente al valor de corte económico de 185 US\$/t.
- CO27: Cut off 27 correspondiente al valor de corte económico de 190 US\$/t.

CO28: Cut off 28 correspondiente al valor de corte económico de 195 US\$/t.

CO29: Cut off 29 correspondiente al valor de corte económico de 200 US\$/t.

Se definen 27 valores para los ritmos de producción que irán incrementándose en valores de 100 tpd y serán denominados como: ROP1, ROP2, ROP3, ...ROP27.

Donde:

ROP1: Ritmo de producción 1 correspondiente al valor de 1,000 tpd.

ROP2: Ritmo de producción 2 correspondiente al valor de 1,100 tpd.

ROP3: Ritmo de producción 3 correspondiente al valor de 1,200 tpd.

ROP4: Ritmo de producción 4 correspondiente al valor de 1,300 tpd.

ROP5: Ritmo de producción 5 correspondiente al valor de 1,400 tpd.

ROP6: Ritmo de producción 6 correspondiente al valor de 1,500 tpd.

ROP7: Ritmo de producción 7 correspondiente al valor de 1,600 tpd.

ROP8: Ritmo de producción 8 correspondiente al valor de 1,700 tpd.

ROP9: Ritmo de producción 9 correspondiente al valor de 1,800 tpd.

ROP10: Ritmo de producción 10 correspondiente al valor de 1,900 tpd.

ROP11: Ritmo de producción 11 correspondiente al valor de 2,000 tpd.

ROP12: Ritmo de producción 12 correspondiente al valor de 2,100 tpd.

ROP13: Ritmo de producción 13 correspondiente al valor de 2,200 tpd.

ROP14: Ritmo de producción 14 correspondiente al valor de 2,300 tpd.

ROP15: Ritmo de producción 15 correspondiente al valor de 2,400 tpd.

ROP16: Ritmo de producción 16 correspondiente al valor de 2,500 tpd.

ROP17: Ritmo de producción 17 correspondiente al valor de 2,600 tpd.

ROP18: Ritmo de producción 18 correspondiente al valor de 2,700 tpd.

ROP19: Ritmo de producción 19 correspondiente al valor de 2,800 tpd.

ROP20: Ritmo de producción 20 correspondiente al valor de 2,900 tpd.

ROP21: Ritmo de producción 21 correspondiente al valor de 3,000 tpd.

ROP22: Ritmo de producción 22 correspondiente al valor de 3,100 tpd.

ROP23: Ritmo de producción 23 correspondiente al valor de 3,200 tpd.

ROP24: Ritmo de producción 24 correspondiente al valor de 3,300 tpd.

ROP25: Ritmo de producción 25 correspondiente al valor de 3,400 tpd.

ROP26: Ritmo de producción 26 correspondiente al valor de 3,500 tpd.

ROP27: Ritmo de producción 27 correspondiente al valor de 3,600 tpd.

4.3.2 Metodología Hill of Value mejorada para el caso C

- Los cut off's destinados a optimizar el VAN evaluando las reservas para los diferentes cut off 's CO1, CO2, CO3, ..., CO29 por la metodología Hill of Value Mejorado; serán definidos como CO1C, CO2C, CO3C, ..., CO29C.
- Los ritmos de producción que buscarán optimizar el VAN evaluando las reservas para los diferentes ritmos de producción ROP1, ROP2, ROP3, ..., ROP27 por la metodología Hill of Value Mejorado; serán definidos como ROP1C, ROP2C, ROP3C, ..., ROP27C. En conjunto con los cut off's, esto dará lugar a un total de 783 combinaciones de escenarios.
- El plan minero simulado para los 27 distintos ritmos de producción que maximiza el VAN con el cut off de valor de CO1C se definirá como LOM1C.
- La evaluación económica para el plan minero LOM1C se definirá como VAN1C y se estimará con una tasa de descuento de 10%.

4.3.3 Selección de reservas para el caso C

Para la selección de reservas son aplicados los diferentes valores de cut off's ya mencionados. Los resultados de la selección de reservas con las consideraciones mencionadas para la aplicación del HoV Mejorado se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23*Reservas seleccionadas para valores de cut off, caso C*

Estimación	Cut off (US\$/t)	Reservas (t)	Ley Media Au (gr/t)	Ley Media Ag (Oz/t)	NSR Media (US\$/t)
01	60	5,715,827	1.89	2.18	111.87
02	65	5,572,037	1.98	2.27	120.19
03	70	5,353,941	2.12	2.42	129.90
04	75	5,229,626	2.20	2.50	135.34
05	80	5,038,609	2.33	2.63	143.55
06	85	4,934,778	2.40	2.70	148.20
07	90	4,735,760	2.53	2.83	156.82
08	95	4,641,201	2.61	2.90	161.66
09	100	4,469,762	2.73	3.05	170.29
10	105	4,369,670	2.81	3.11	175.12
11	110	4,225,990	2.94	3.25	183.88
12	115	4,150,405	3.01	3.31	188.46
13	120	4,023,248	3.12	3.44	196.49
14	125	3,946,249	3.21	3.53	202.08
15	130	3,837,407	3.30	3.62	208.33
16	135	3,770,067	3.37	3.69	212.88
17	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92
18	145	3,590,962	3.49	3.82	221.28
19	150	3,495,853	3.51	3.84	222.63
20	155	3,432,152	3.53	3.86	223.99
21	160	3,327,253	3.55	3.88	225.35
22	165	3,280,993	3.57	3.90	226.70
23	170	3,188,029	3.59	3.92	228.06
24	175	3,140,046	3.61	3.94	229.42
25	180	3,041,150	3.63	3.96	230.78
26	185	2,999,893	3.65	3.98	232.14
27	190	2,933,636	3.67	4.00	233.50
28	195	2,898,677	3.69	4.02	234.86
29	200	2,826,066	3.71	4.04	236.22

Fuente: Elaboración propia

Cada uno de estos 29 escenarios representan proyectos mineros de tamaño muy diferentes. Si comparamos los casos extremos de la Tabla 24, las reservas seleccionadas para el escenario 1 (valor de cut off de 60 US\$/t) y escenario 29 (valor de cut off de 200 US\$/t), son de 5,715,827t y 2,826,066t respectivamente.

La Figura 56 muestra la curva tonelaje de reservas – cut off para el caso C, la cual permite visualizar el tonelaje de reservas y el NSR medio del depósito en función al valor de cut off que se seleccione.

Figura 56

Curva tonelaje de reservas vs cut off, caso C

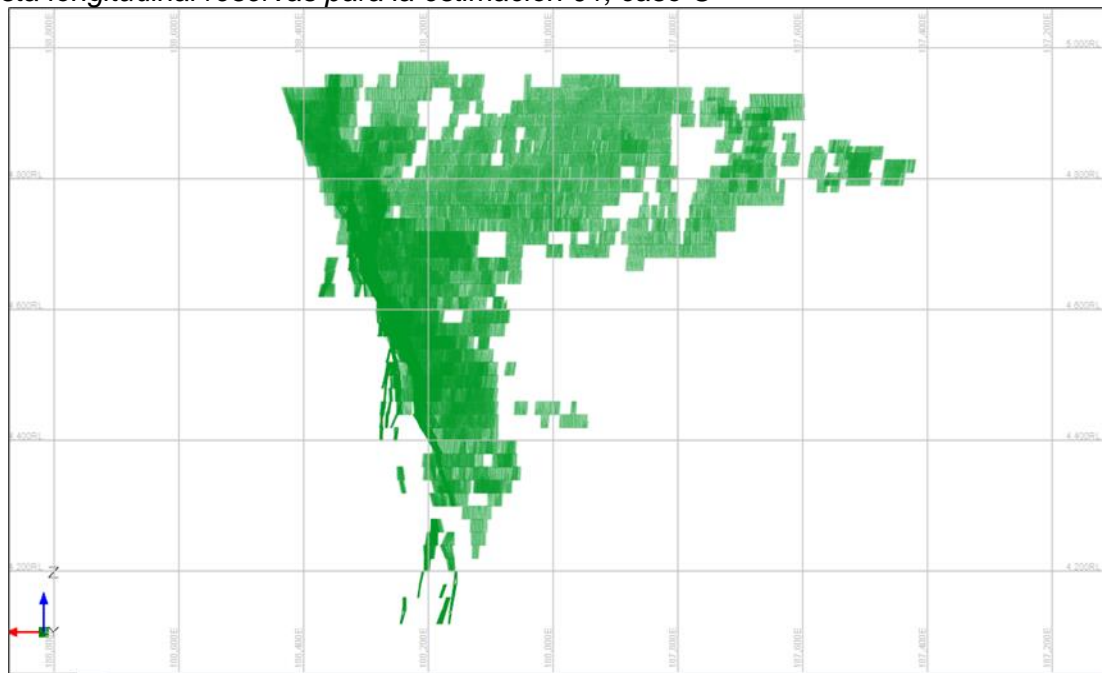


Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 57 y 58 representan las reservas de estos escenarios mencionados, en donde la grilla de 200m x 200m se representa de color plomo, mientras que los bloques de color verde corresponden a las reservas.

Figura 57

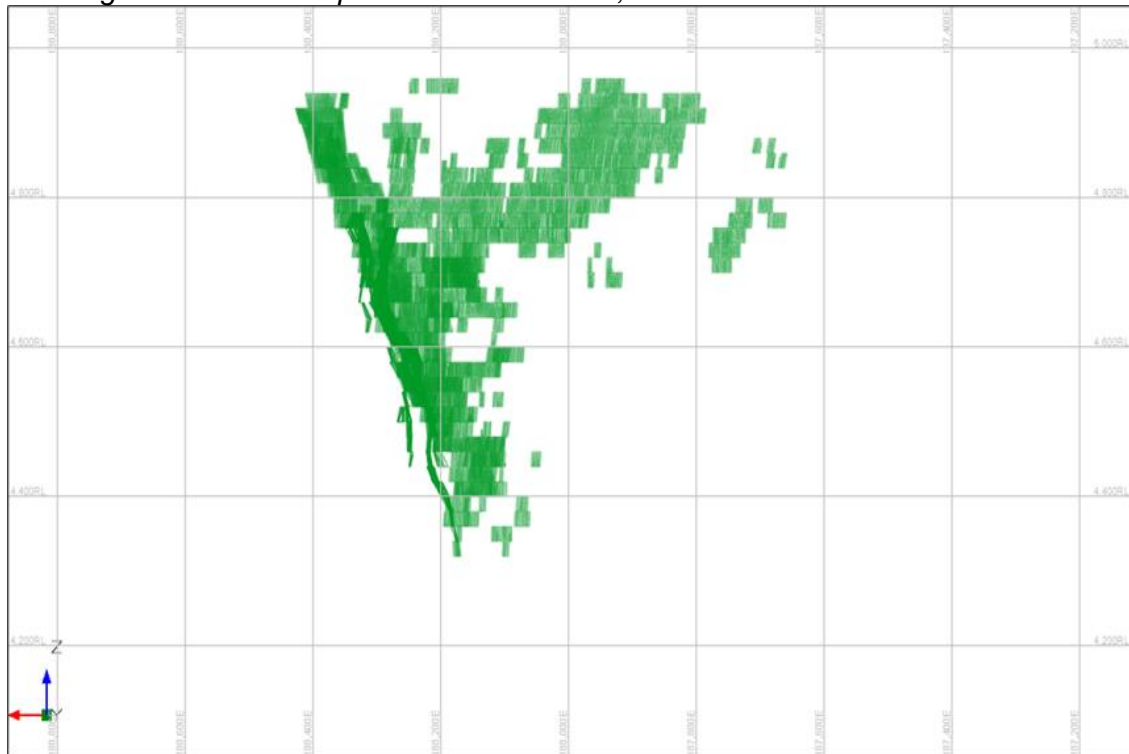
Vista longitudinal reservas para la estimación 01, caso C



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Vista longitudinal reservas para la estimación 29, caso C

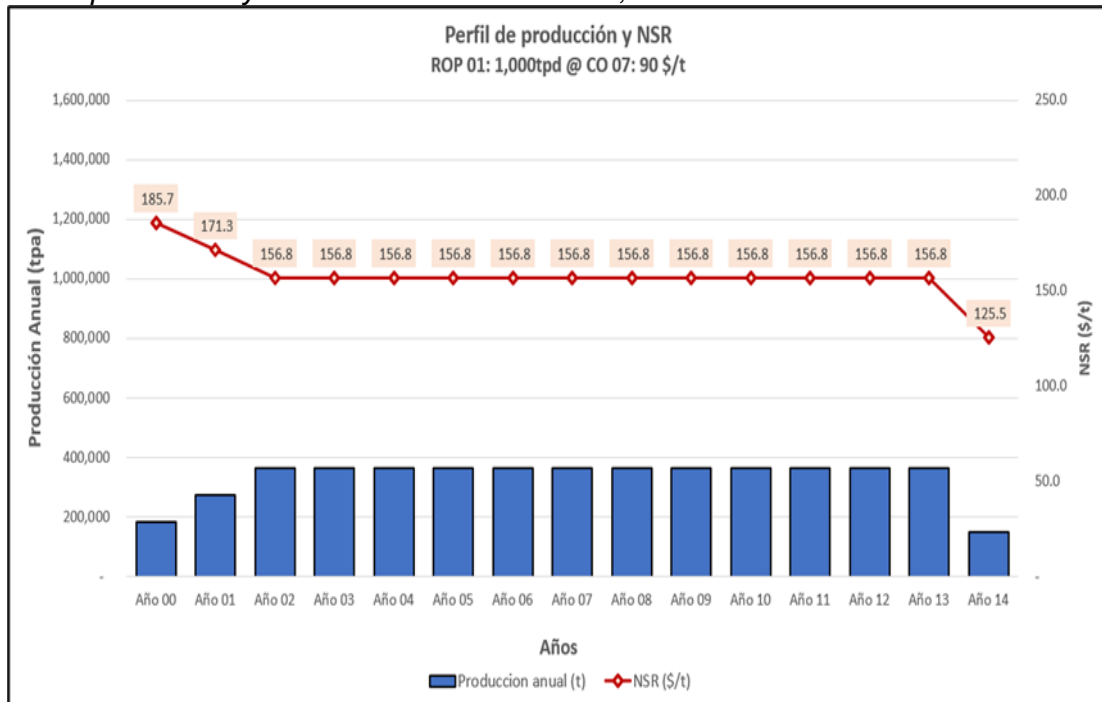


Fuente: Elaboración propia

La preparación de los LOMs que serán las bases para los cash-flows para la metodología mejorada, privilegiara la extracción temprana de aquellas zonas que aporten mayor beneficio por tonelada, para este yacimiento el inicio de la producción iniciara desde el nivel Nv. 4600. Se observa en la Figura 59, que la zona de inicio de explotación inicial estará ubicada en el centro del cuerpo, ya que en ella se encuentran las mayores leyes de Au. La secuencia continuara hacia las zonas con menores leyes de Au localizadas en la periferia de la zona inicial.

Figura 60

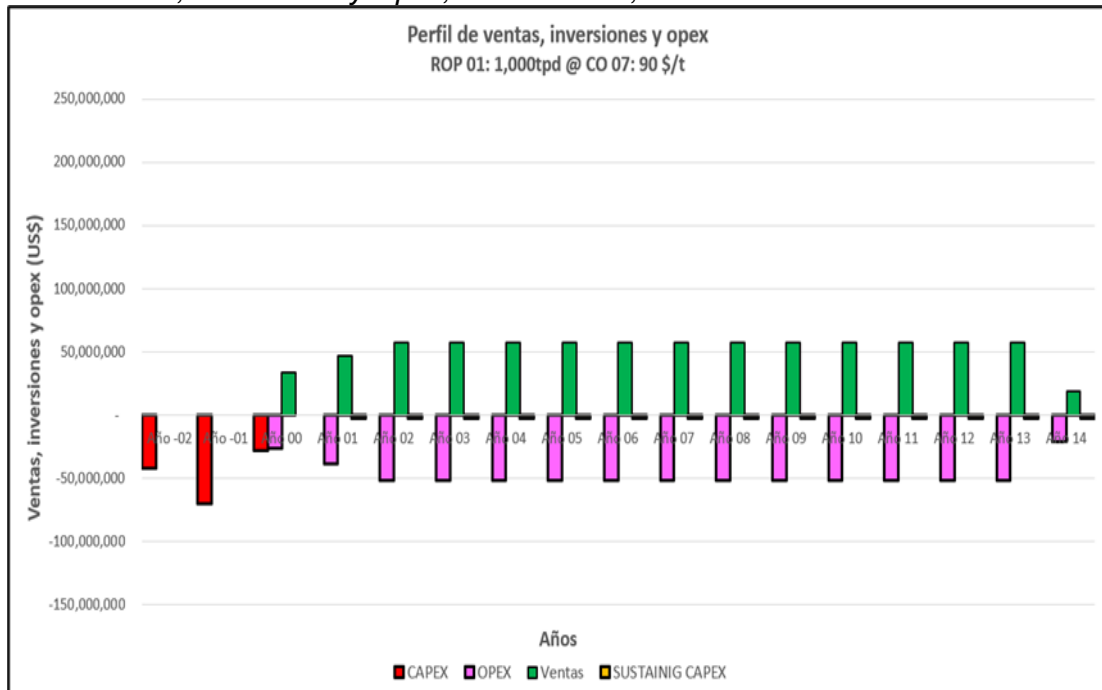
Perfil de producción y NSR medio – Escenario 07, caso C



Fuente: Elaboración propia

Figura 61

Perfil de ventas, inversiones y Opex, Escenario 07, caso C



Fuente: Elaboración propia

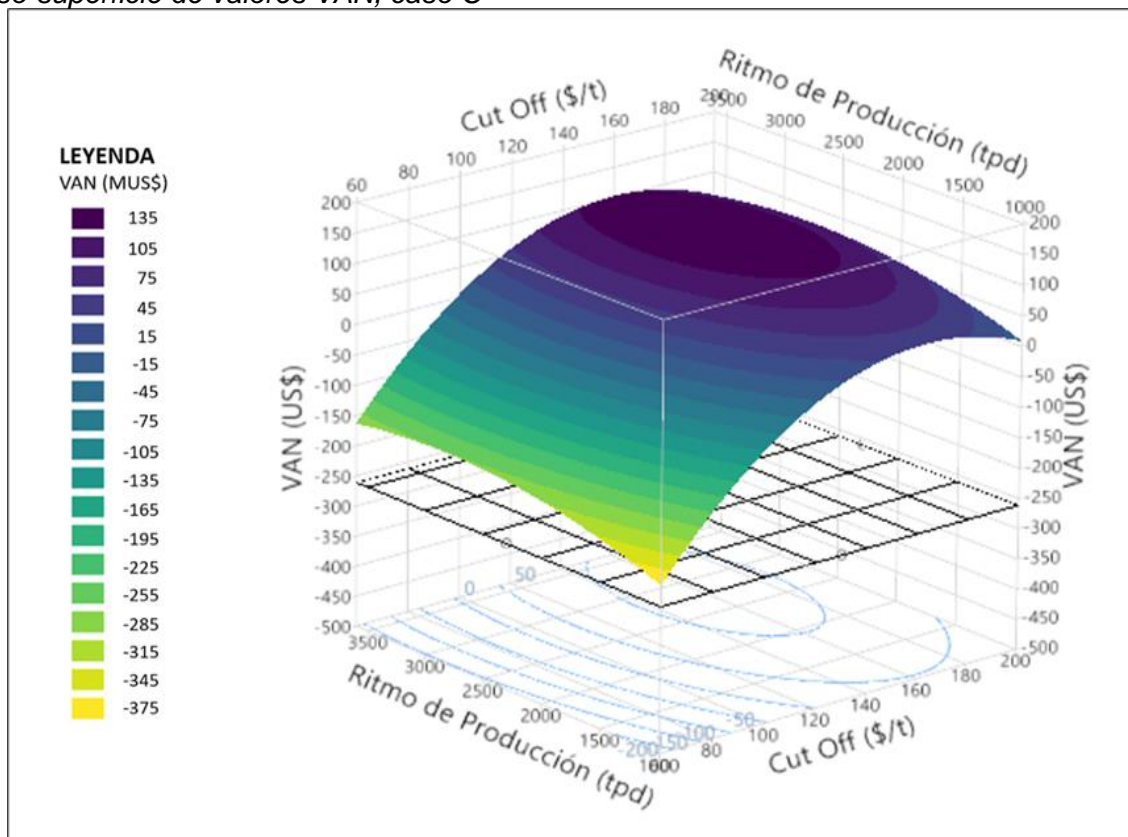
4.3.4 Aplicación del Hill of Value mejorado

La Figura 62 muestra las dos variables dependientes de optimización; en el eje “x” indica el ritmo de producción diario (valores que van desde 1,000 tpd, 1,100 tpd, 1,200 tpd, hasta 3,600 tpd), en el eje “y” indica el valor de cada cut off relacionado con su respectivo escenario (valores que van desde 60 US\$/t, 65 US\$/t, 70 US\$/t hasta 200 US\$/t) y, por último, en el eje “z” se representa el Valor Actual Neto estimado para cada proyecto.

Para generar la Iso-superficie de valores de VAN con el fin de obtener el valor del Hill of Value Mejorado, ha sido necesario plotear los valores de VAN producto de la evaluación económica de cada uno de los 783 escenarios (que se muestran en la Tabla 24 de doble entrada) en la plataforma del software JMP Statistical Discovery. La Iso-superficie de valores de VAN para el caso C es presentado en la Figura 62.

Figura 62

Iso-superficie de valores VAN, caso C



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

Resumen de valores VAN (M US\$), 783 escenarios, caso C

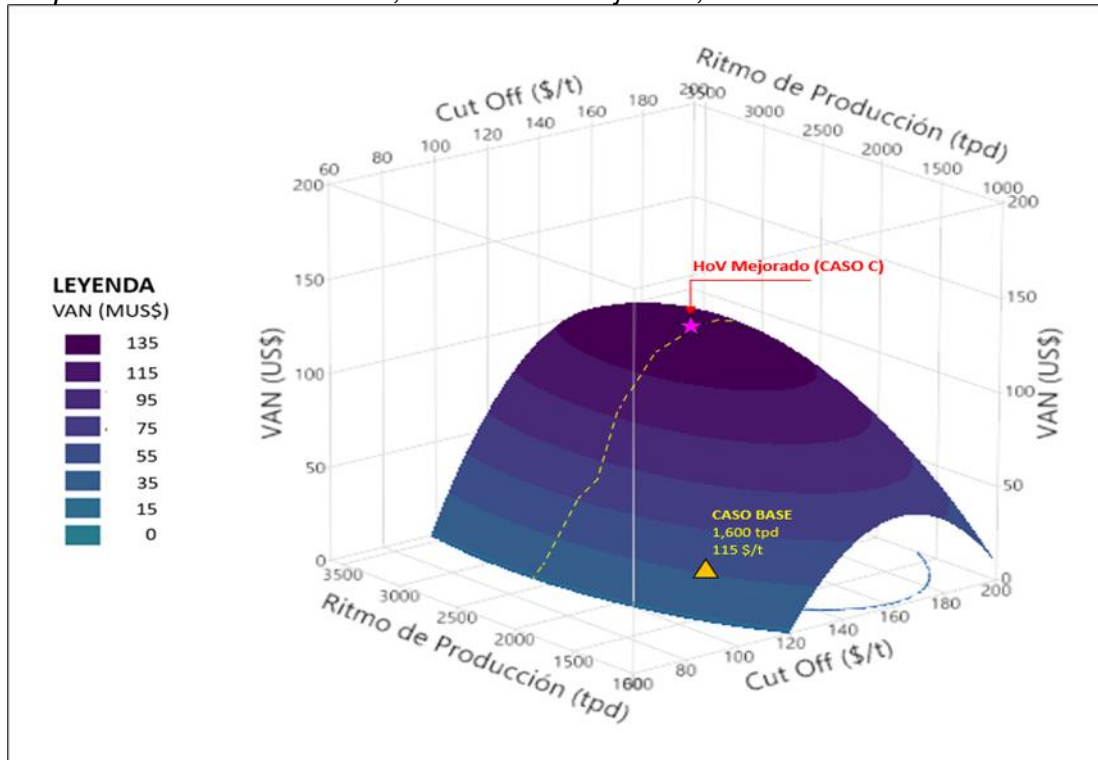
ROP (tpd)	CUT OFF (US\$/t)																												
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
3,600	-173.2	-138.4	-104.1	-85.9	-60.2	-46.3	-22.5	-9.3	12.6	23.9	49.2	59.1	75.8	87.4	97.9	106.0	117.6	114.8	110.1	108.0	102.0	101.3	96.2	95.1	89.0	88.4	89.8	89.2	84.29
3,500	-172.5	-141.7	-103.4	-85.3	-59.6	-45.8	-22.1	-8.9	12.9	24.2	45.2	59.8	76.4	88.0	98.5	106.6	118.2	115.4	110.7	108.6	102.7	102.0	96.8	95.8	89.7	89.1	85.9	85.7	80.78
3,400	-171.8	-141.2	-106.8	-84.7	-59.1	-45.4	-21.7	-8.6	13.1	24.3	45.3	55.6	77.1	88.7	99.1	107.1	118.7	115.9	111.2	109.2	103.3	102.6	97.5	96.4	90.4	89.8	86.6	86.4	81.46
3,300	-171.2	-140.7	-106.5	-88.2	-58.7	-45.0	-21.4	-8.3	13.3	24.5	45.3	55.5	72.8	84.9	99.6	107.6	119.	116.4	111.8	109.7	103.9	103.2	98.1	97.0	91.0	90.4	87.3	87.1	82.13
3,200	-170.7	-140.3	-106.2	-88.1	-58.3	-44.6	-21.1	-8.1	13.5	24.6	45.3	55.5	72.7	84.6	95.8	108.1	119.7	116.9	112.3	110.3	104.4	103.7	98.7	97.6	91.7	91.0	87.9	87.7	82.77
3,100	-148.3	-139.9	-106.0	-88.0	-62.3	-48.4	-20.9	-7.9	13.5	24.6	45.2	55.4	72.5	84.4	95.4	103.9	120.1	117.3	112.7	110.7	104.9	104.2	99.2	98.2	92.3	91.6	88.5	88.3	83.39
3,000	-148.6	-139.7	-105.9	-88.0	-62.4	-48.6	-24.6	-7.8	13.5	24.6	45.1	55.2	72.2	84.1	95.1	103.4	115.6	113.5	113.1	111.1	105.4	104.7	99.7	98.7	92.8	92.2	89.1	88.9	83.97
2,900	-152.3	-123.8	-105.9	-88.1	-62.6	-48.9	-25.1	-11.9	13.5	24.5	44.9	54.9	71.9	83.7	94.6	102.9	115.1	113.0	109.2	111.5	105.8	105.1	100.2	99.1	93.3	92.7	89.7	89.5	84.51
2,800	-153.0	-124.6	-88.0	-70.2	-62.9	-49.3	-25.6	-12.5	9.4	20.7	44.6	54.6	71.5	83.2	94.1	102.4	114.5	112.4	108.6	107.2	102.3	105.5	100.5	99.5	93.8	93.2	90.1	90.0	85.01
2,700	-153.7	-125.5	-92.2	-74.3	-45.8	-32.2	-26.2	-13.2	8.5	19.8	40.7	54.2	71.0	82.7	93.5	101.7	113.8	111.7	107.9	106.5	101.7	101.5	100.9	99.9	94.2	93.6	90.6	90.4	85.45
2,600	-154.6	-126.5	-93.5	-75.7	-50.1	-33.5	-9.9	3.0	7.6	18.8	39.5	49.8	70.4	82.0	92.8	101.0	113.0	110.9	107.2	105.8	101.0	100.8	96.7	96.1	94.5	93.9	90.9	90.8	85.8
2,500	-158.3	-127.7	-94.9	-77.2	-51.9	-38.1	-11.5	1.4	23.0	34.2	38.3	48.5	65.7	77.7	92.0	100.2	112.1	110.0	106.4	105.0	100.3	100.0	96.0	95.4	90.6	90.4	91.2	91.1	86.1
2,400	-159.6	-131.7	-96.4	-78.9	-53.7	-40.1	-16.4	-3.3	21.1	32.2	52.8	62.9	64.1	76.0	87.3	95.8	111.0	109.1	105.4	104.1	99.4	99.2	95.2	94.6	89.8	89.6	87.3	87.4	82.4
2,300	-161.1	-133.4	-100.8	-80.7	-55.8	-42.2	-18.7	-5.7	16.1	30.1	50.5	60.6	77.7	89.5	85.3	93.8	106.2	104.7	104.4	103.0	98.4	98.2	94.2	93.7	89.0	88.8	86.4	86.6	81.6
2,200	-162.8	-135.3	-103.0	-85.6	-60.5	-44.6	-21.2	-8.3	13.3	24.6	45.4	58.2	75.1	86.8	98.0	106.4	103.9	102.5	99.6	98.7	97.3	97.1	93.2	92.7	88.0	87.8	85.5	85.7	80.7
2,100	-166.9	-139.6	-105.4	-88.2	-63.3	-49.8	-24.0	-11.2	10.2	21.5	42.1	52.3	72.3	83.9	95.0	103.4	115.6	114.2	111.4	96.4	92.6	92.8	92.0	91.5	86.9	86.7	84.4	84.6	79.6
2,000	-169.1	-142.1	-110.3	-91.0	-66.4	-53.1	-29.7	-16.8	7.0	18.1	38.5	48.6	65.8	77.7	89.3	100.2	112.3	111.0	108.2	107.4	103.7	90.3	87.2	87.0	85.6	85.4	83.2	83.4	78.4
1,900	-171.7	-144.9	-113.4	-96.4	-71.8	-56.6	-33.4	-20.7	0.8	12.1	34.7	44.7	61.7	73.5	85.0	93.5	106.1	107.4	104.7	103.9	100.3	100.5	97.4	97.3	80.7	80.8	81.8	81.9	76.9
1,800	-176.4	-149.9	-116.9	-100.1	-75.9	-62.7	-37.5	-24.9	-3.6	7.5	28.0	38.2	57.3	69.0	80.3	88.8	101.3	100.4	98.3	100.2	96.7	96.9	93.9	93.8	90.1	90.3	88.6	89.1	84.1
1,700	-179.6	-153.5	-122.8	-106.1	-80.3	-67.3	-44.3	-31.7	-8.4	2.6	22.8	32.8	49.9	61.7	75.4	83.7	96.1	95.3	93.2	92.9	90.1	90.5	90.1	90.0	86.4	86.6	85.0	85.5	80.5
1,600	-184.9	-157.6	-127.3	-110.9	-87.1	-74.1	-49.6	-37.2	-14.2	-3.0	17.1	27.1	43.9	55.6	67.1	75.7	88.4	89.7	87.8	87.5	84.7	85.2	82.9	83.1	82.4	82.6	81.0	81.5	76.5
1,500	-177.5	-163.7	-133.9	-117.8	-92.8	-80.0	-57.4	-45.0	-22.4	-11.4	8.5	18.5	35.5	49.0	60.4	68.8	81.3	81.0	79.6	79.6	79.0	79.5	77.3	77.5	74.8	75.2	74.1	74.9	69.9
1,400	-183.0	-159.1	-130.1	-112.9	-100.7	-88.1	-65.7	-52.1	-31.3	-20.3	-0.4	11.0	27.7	39.2	50.8	59.4	73.7	73.4	72.1	72.2	70.2	70.9	71.1	71.4	68.8	69.3	68.2	69.0	64.0
1,300	-190.2	-166.9	-138.5	-121.8	-99.0	-86.6	-63.3	-51.2	-41.0	-28.6	-9.1	0.7	17.4	28.9	41.9	50.3	62.8	62.9	62.1	64.1	62.2	63.0	61.5	62.0	60.0	60.7	61.8	62.5	57.5
1,200	-197.8	-175.2	-146.6	-131.4	-109.1	-96.9	-74.2	-62.3	-40.8	-30.0	-10.6	-0.8	7.3	18.6	30.1	38.6	51.2	52.9	52.2	52.6	51.3	52.3	51.3	53.5	51.6	52.4	51.9	52.8	47.8
1,100	-206.0	-184.2	-157.4	-141.8	-120.2	-108.3	-86.1	-74.5	-53.5	-42.9	-23.8	-14.1	3.3	14.4	26.0	34.4	39.2	39.6	39.4	40.1	39.3	41.7	40.8	41.7	40.4	41.3	41.2	43.7	38.7
1,000	-215.5	-194.5	-168.1	-153.9	-132.3	-120.7	-99.3	-88.0	-67.6	-57.2	-38.5	-29.0	-12.0	-1.0	10.4	18.7	32.2	32.9	33.1	34.0	34.7	27.7	27.3	28.4	27.6	29.9	29.9	31.0	26.0

Fuente: Elaboración propia

La estrategia óptima para maximizar el valor de VAN se basará de igual forma en la búsqueda de la combinación de las variables cut off y el ritmo de producción, que puedan colocar el valor del proyecto en la cima del HoV.

Figura 63

Iso-superficie de valores VAN>0, Hill of Value mejorado, caso C



Fuente: Elaboración propia

Por ello, para la iso-superficie de valores de VAN que se muestra en la Figura 63 se muestra una serie de color amarillo que representarán los valores máximos de VAN para diferentes valores de las variables dependientes de cut off y ritmos de producción. Los valores óptimos de las variables dependientes que maximizan el VAN se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25

Variables seleccionadas para obtener HoV, caso C

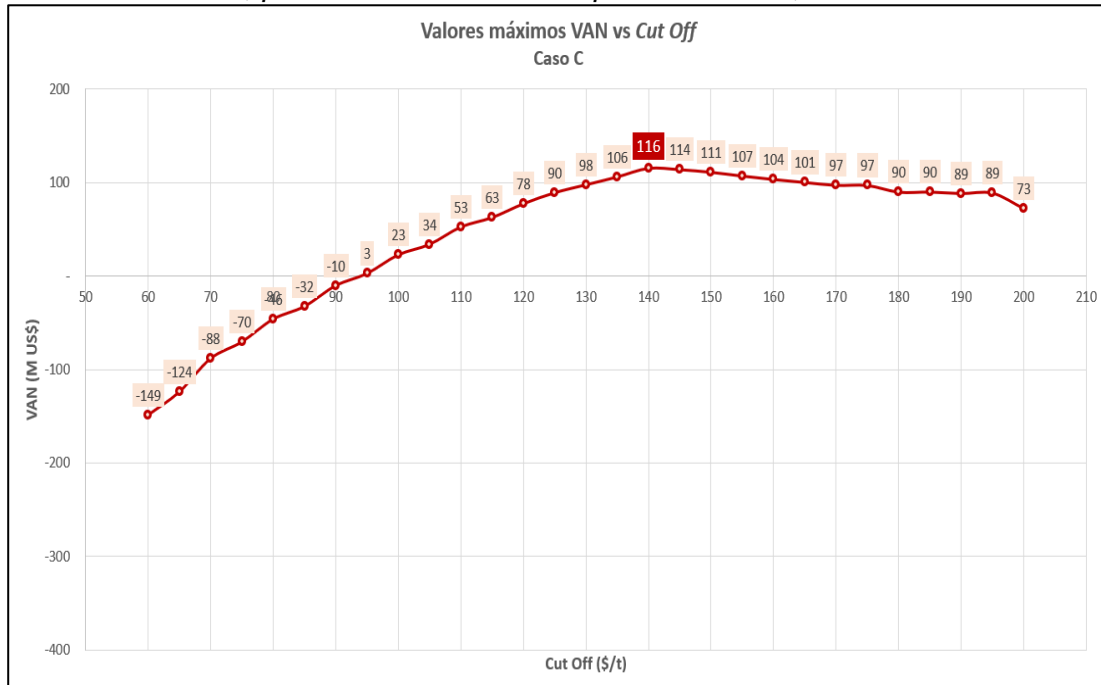
VARIABLE	UNIDAD	VALOR
Cut off (US\$/t)	CO17c	140 US\$/t
Ritmo de Producción (tpd)	ROP12c	2,100 tpd

Fuente: Elaboración propia

La Figura 64 representa los valores máximos de VAN para cada uno de los 29 cut off's mencionados anteriormente, incluidos los valores negativos.

Figura 64

Curva VAN vs cut off, para obtención de valor óptimo de cut off, caso C



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 26 detalla las características de cada uno de estos valores óptimos, se ha destacado en color magenta el escenario que representa un mayor VAN. Este valor de VAN también nos da referencia del rango de valores de cut off que generan mayor valor económico al proyecto y que se acotan entre 135 US\$/t a 150 US\$/t, de este rango se selecciona el valor de cut off óptimo que será de 140 US\$/t.

Tabla 26*Valores de VAN para diferentes cut off, caso C*

Estimación	Cut off (US\$/t)	Reservas (t)	Ley media Au (g/t)	Ley media Ag (Oz/t)	NSR media (US\$/t)	Ritmo de Producción (tpd)	LOM (años)	VAN (M US\$)	IVAN
1	60	5,715,827	1.89	2.18	111.87	3,000	6.0	-148.64	-0.60
2	65	5,572,037	1.98	2.27	120.19	2,900	6.0	-123.85	-0.51
3	70	5,353,941	2.12	2.42	129.90	2,800	6.0	-88.08	-0.37
4	75	5,229,626	2.20	2.50	135.34	2,800	5.9	-70.24	-0.29
5	80	5,038,609	2.33	2.63	143.55	2,700	5.9	-45.88	-0.19
6	85	4,934,778	2.40	2.70	148.20	2,700	5.8	-32.23	-0.14
7	90	4,735,760	2.53	2.83	156.82	2,600	5.7	-9.98	-0.04
8	95	4,641,201	2.61	2.90	161.66	2,600	5.6	3.02	0.01
9	100	4,469,762	2.73	3.05	170.29	2,500	5.7	23.01	0.10
10	105	4,369,670	2.81	3.11	175.12	2,500	5.5	34.21	0.15
11	110	4,225,990	2.94	3.25	183.88	2,400	5.9	52.81	0.24
12	115	4,150,405	3.01	3.31	188.46	2,400	5.7	62.97	0.28
13	120	4,023,248	3.12	3.44	196.49	2,300	5.5	77.70	0.36
14	125	3,946,249	3.21	3.53	202.08	2,300	5.5	89.53	0.41
15	130	3,837,407	3.30	3.62	208.33	2,200	5.5	98.04	0.46
16	135	3,770,067	3.37	3.69	212.88	2,200	5.4	106.44	0.50
17	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,100	5.5	115.68	0.56
18	145	3,590,962	3.49	3.82	221.28	2,100	5.4	114.28	0.55
19	150	3,495,853	3.51	3.84	222.63	2,100	5.3	111.46	0.54
20	155	3,432,152	3.53	3.86	223.99	2,000	5.5	107.41	0.53
21	160	3,327,253	3.55	3.88	225.35	2,000	5.3	103.73	0.52
22	165	3,280,993	3.57	3.90	226.70	1,900	5.5	100.53	0.51
23	170	3,188,029	3.59	3.92	228.06	1,900	5.4	97.45	0.50
24	175	3,140,046	3.61	3.94	229.42	1,900	5.3	97.31	0.50
25	180	3,041,150	3.63	3.96	230.78	1,800	5.4	90.15	0.47
26	185	2,999,893	3.65	3.98	232.14	1,800	5.3	90.31	0.47
27	190	2,933,636	3.67	4.00	233.50	1,800	5.2	88.67	0.47
28	195	2,898,677	3.69	4.02	234.86	1,800	5.2	89.13	0.47
29	200	2,826,066	3.71	4.04	236.22	1,800	5.1	72.55	0.38

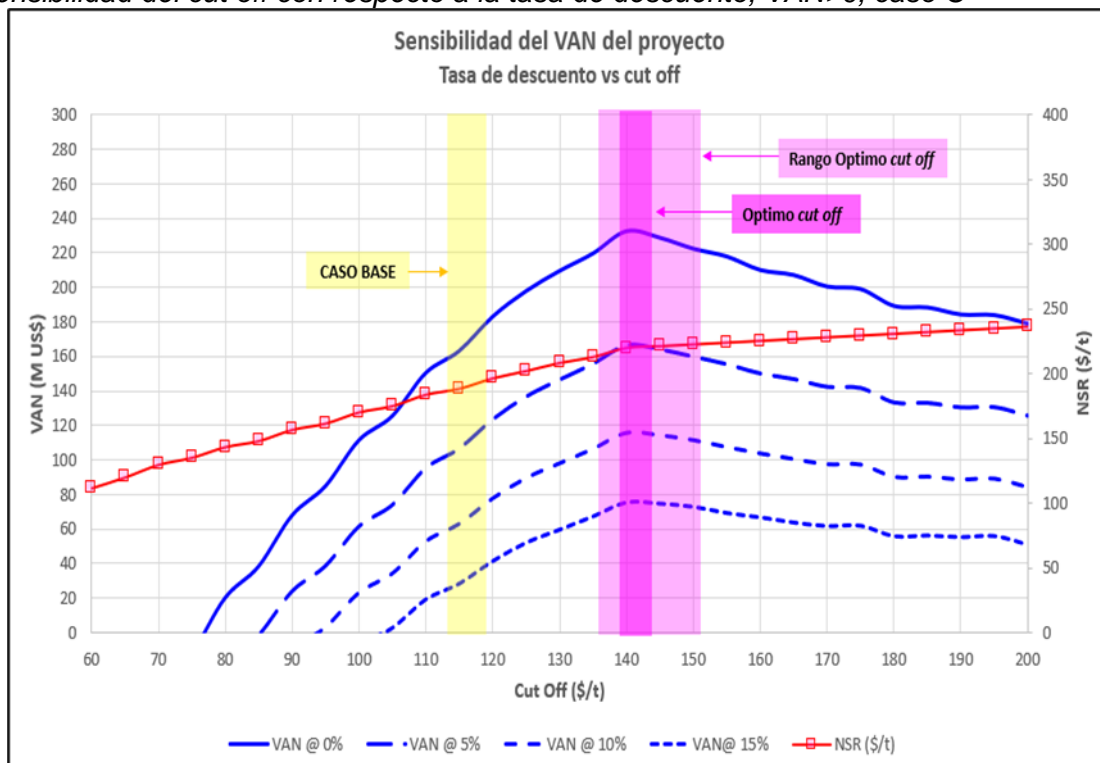
Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de tener confiabilidad en la elección del valor de cut off óptimo se realizaron sensibilidades a los parámetros más influyentes que son la tasa de descuento aplicada al proyecto y al precio del metal más importante del yacimiento que es el Au.

La sensibilidad para la tasa de descuento con respecto al valor de cut off se muestra en la Figura 65, en la cual podemos apreciar que la tasa de descuento que varía entre los valores de 0% a 15% no influye directamente al rango de valores de cut off que maximizan el valor económico del proyecto, se observa que el rango de valores sigue siendo entre 135 US\$/t a 150 US\$/t, y el valor de cut off óptimo para cada valor de tasa de descuento se mantiene en 140 US\$/t.

Figura 65

Sensibilidad del cut off con respecto a la tasa de descuento, VAN>0, caso C



Fuente: Elaboración propia

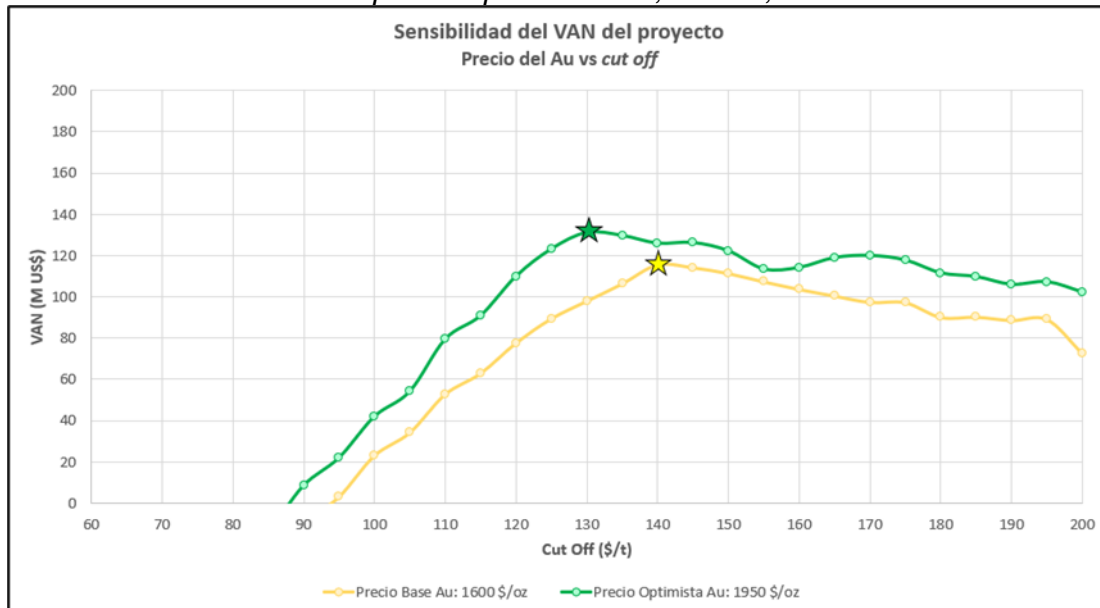
Por otro lado, teniendo en consideración que el metal más importante y determinante del yacimiento es el Au, se debe realizar una sensibilidad al precio del Au en un escenario optimista, esta sensibilidad se realiza en base al procedimiento ya mencionado para la generación de curva de VAN vs cut off. El área financiera de la empresa definió el precio del Au para este escenario optimista en 1,950 US\$/oz.

En la Figura 66 se presenta el VAN en función del valor de cut off para dos escenarios distintos de precio del oro (Au). En el caso optimista, con un precio Au de 1,950 US\$/oz, el pico de la curva se alcanza con un valor de cut off de 130 US\$/t. En contraste,

cuando se utiliza el precio base del proyecto de 1,600 US\$/oz, el cut off óptimo ya seleccionado es de 140 US\$/t. Esto permite concluir que el valor óptimo del cut off se comporta de manera inversamente proporcional al precio del metal, es decir, a medida que aumenta el precio del Au, el valor óptimo del cut off disminuye.

Figura 66

Sensibilidad del cut off con respecto al precio del Au, VAN>0, caso C



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la selección del valor de cut off, una opción sería optar por el valor que maximice el VAN bajo un escenario de precios más altos, lo que incrementaría el valor económicos total del proyecto. Sin embargo, al realizar el análisis exhaustivo que se resume en la Figura 67 y la Tabla 27, se observa que, aunque el escenario optimista ofrece un cut off óptimo de 130 US\$/t, este solo proporciona un beneficio marginal adicional de 5.22M US\$ (+4.5%) (señalado con la flecha 1) en comparación con mantener el valor de cut off óptimo obtenido con el precio base. Es importante destacar que, en un escenario sin fluctuaciones en el precio del Au, donde este se mantuviera en 1,600 US\$/oz, la adopción del cut off óptimo de 130 US\$/t implicaría una pérdida de oportunidad de 17.64M US\$ en comparación con el valor asociado al cut off óptimo base de 140 US\$/t.

Adicionalmente, seleccionar un cut off óptimo de 130 US\$/t bajo la perspectiva de que se alcance el precio optimista del Au, y que este escenario finalmente no se

materialice, podría resultar en una pérdida económica de hasta 33.13M US\$ (señalado con la flecha 3) en comparación con el VAN esperado para ese escenario, debido a las fluctuaciones adversas del mercado. En consecuencia, mantener un cut off de 140 US\$/t representa una estrategia más conservadora que mitiga la variabilidad y el riesgo asociados con las fluctuaciones del precio del Au. Aunque un aumento en el precio del Au podría resultar en un incremento económico adicional de 10.27M US\$ (señalado con la flecha 2), este aumento es relativamente modesto en comparación con el riesgo potencial de una pérdida económica significativa que podría derivarse de un cut off más bajo, especialmente si el precio optimista no se materializa.

Tabla 27

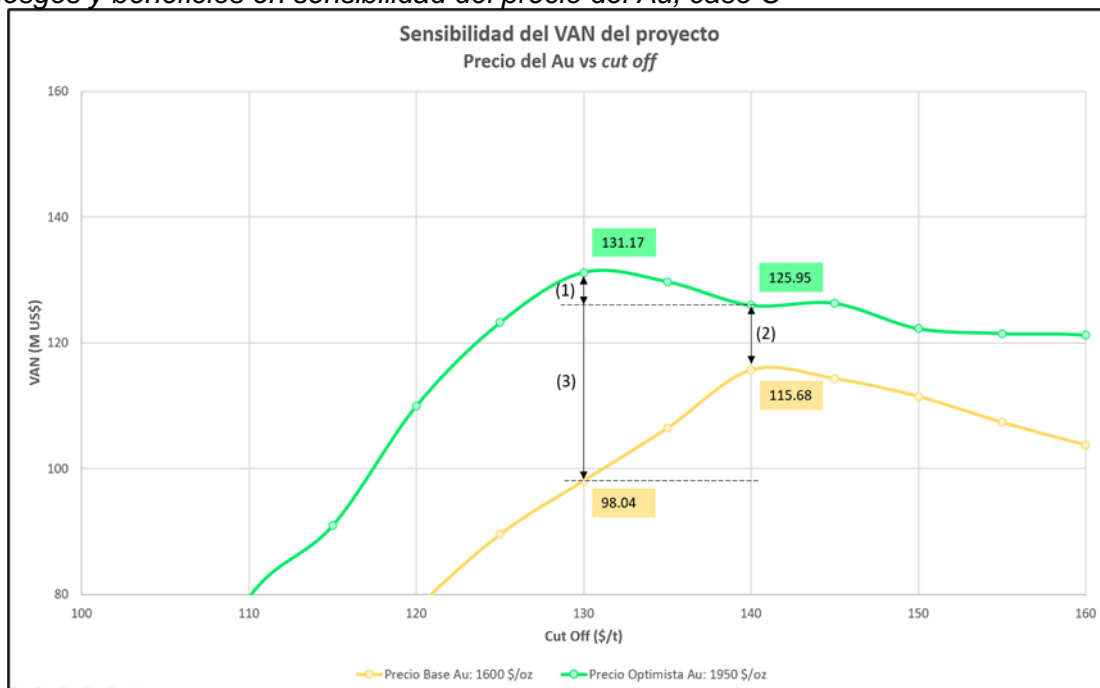
Valores VAN (M US\$) para sensibilidad del precio del Au, caso C

Variables	Cut off		Δ Beneficio Real (M US\$)	
	Precio Au (US\$/Oz)	VAN (M US\$)		VAN (M US\$)
		130 US\$/t	140 US\$/t	
	1,600	98.04	115.68	17.64
	1,950	131.17	125.95	5.22
Δ Variabilidad (M US\$)		33.13	10.27	

Fuente: Elaboración propia

Figura 67

Riesgos y beneficios en sensibilidad del precio del Au, caso C



Fuente: Elaboración propia

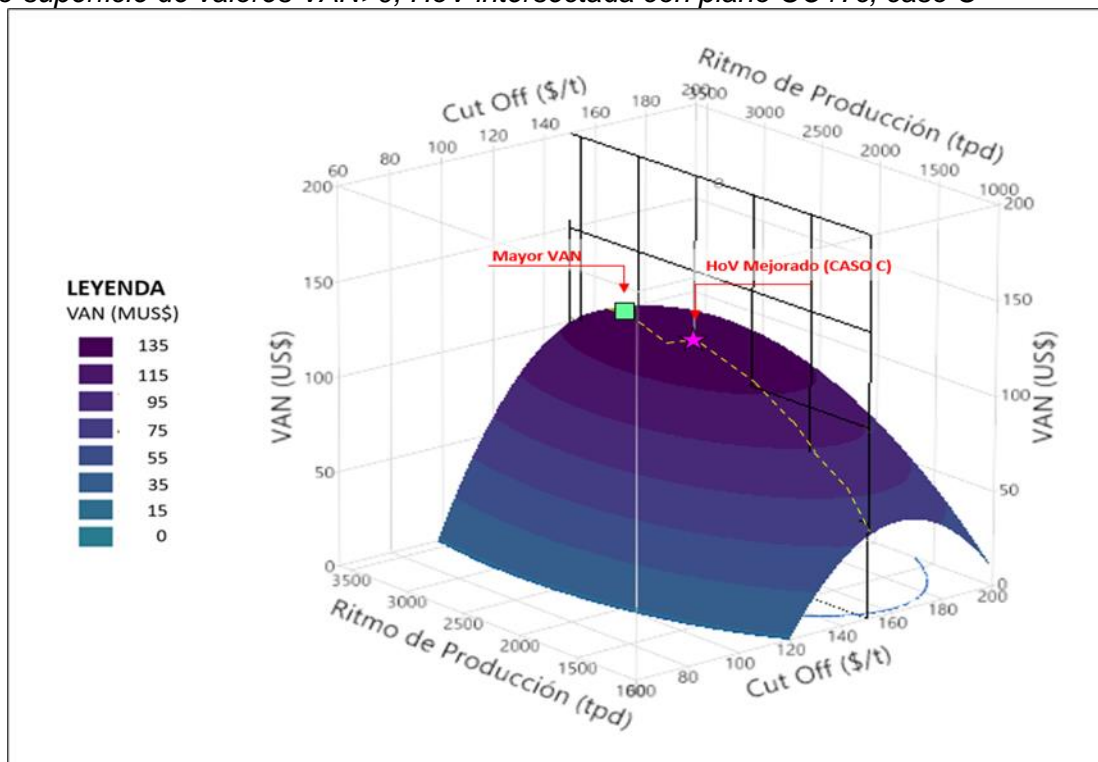
En conclusión, el valor de cut off de 140 US\$/t se considera el más robusto y óptimo para el proyecto. Este valor ofrece una mayor estabilidad y confiabilidad frente a las fluctuaciones del precio del Au, reduciendo significativamente el riesgo asociado con las incertidumbres del mercado. Al elegir este cut off, se reduce significativamente el riesgo de pérdidas económicas sustanciales en comparación con valores más bajos, garantizando así una mayor seguridad y estabilidad frente a las fluctuaciones del precio del metal.

Consecuentemente, si intersectamos la superficie de contorno con el plano que genera el valor de CO17C (140 US\$/t).

$$P_{CO}: CO_C - 140 ; \forall ROP_C \in \{1,000; 3,600\}$$

Figura 68

Iso-superficie de valores VAN > 0, HoV intersectada con plano CO17c, caso C



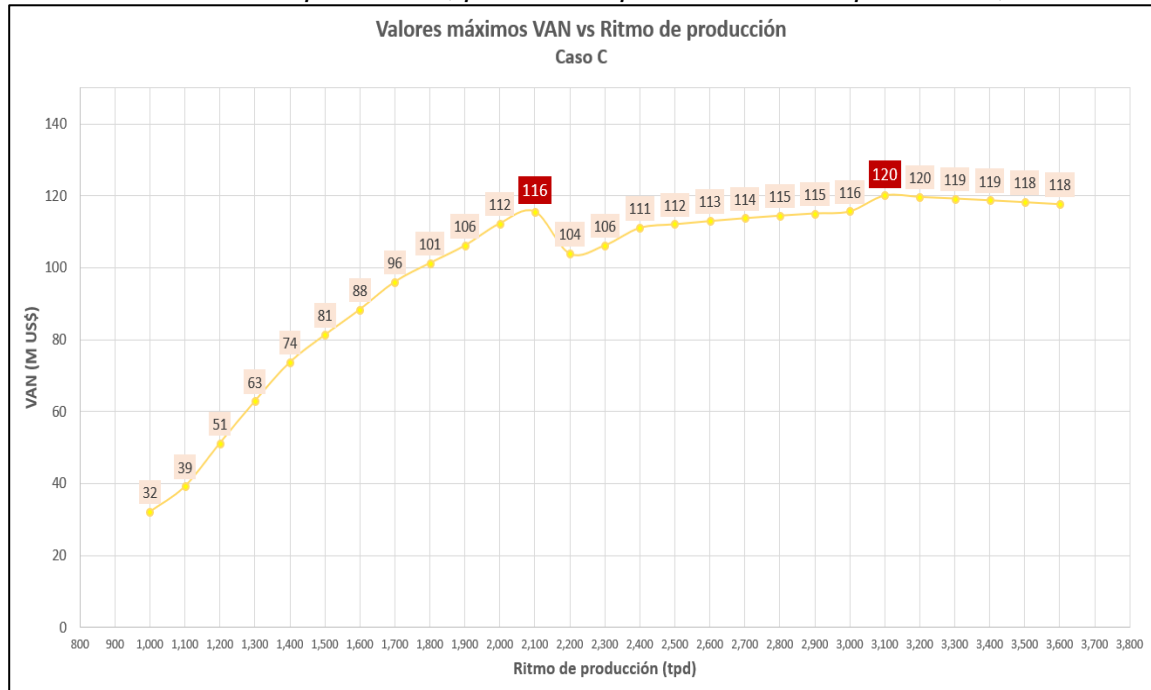
Fuente: Elaboración propia

Se identificarán los puntos que maximizan el VAN para distintos ritmos de producción, utilizando el valor óptimo de cut off previamente determinado. La Figura 69 muestra la serie de puntos correspondientes a los valores máximos de VAN para cada uno de los 27 ritmos de producción evaluados, considerando un cut off de 140 US\$/t. De este

análisis, se concluye que el ritmo de producción que maximiza el VAN del proyecto es de 2,100 tpd.

Figura 69

Curva VAN vs ritmo de producción, para valor óptimo de ritmo de producción, caso C



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la curva de la Figura 69, se identifican dos picos: un máximo local para un ritmo de producción (ROP) de 2,100 tpd y un máximo global del VAN para el valor para un ROP de 3,100 tpd. Esta dualidad se debe a un procesos de debottlenecking, o descongestionamiento del cuello de botella, asociado a los recursos disponibles. Para aumentar la producción, es necesaria una inversión significativa, como se explicó en el capítulo del marco teórico.

La Tabla 28 detalla las características de cada uno de los ritmos de producción representados en la curva. Los escenarios que maximizan el VAN, correspondientes a los ROP de 2,100tpd y 3,100tpd, se destacan en color verde. Si bien el ROP de 3,100tpd no es el ritmo óptimo a elegir, requiere un análisis adicional debido a la meseta observada en los valores de VAN. Por esta razón, los valores de la meseta se resaltan en verde claro.

Tabla 28*Valores de VAN para diferentes valores de ROP's para cut off óptimo, caso C*

Estimación	Cut off (\$/t)	Reservas (t)	Ley media Au (g/t)	Ley media Ag (Oz/t)	NSR media (\$/t)	Ritmo de Producción (tpd)	LOM (años)	VAN (M US\$)	IVAN
1	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,000	10.8	32.21	0.23
2	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,100	9.9	39.21	0.27
3	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,200	9.1	51.21	0.33
4	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,300	8.5	62.89	0.39
5	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,400	7.9	73.73	0.44
6	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,500	7.5	81.34	0.47
7	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,600	7.0	88.41	0.49
8	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,700	6.7	96.11	0.52
9	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,800	6.3	101.30	0.53
10	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	1,900	6.0	106.17	0.54
11	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,000	5.8	112.35	0.56
12	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,100	5.5	115.68	0.56
13	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,200	5.3	103.96	0.49
14	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,300	5.1	106.23	0.49
15	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,400	4.9	111.09	0.50
16	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,500	4.8	112.11	0.50
17	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,600	4.6	113.00	0.49
18	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,700	4.5	113.80	0.48
19	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,800	4.3	114.50	0.48
20	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	2,900	4.2	115.13	0.47
21	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,000	4.1	115.69	0.46
22	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,100	4.0	120.10	0.47
23	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,200	3.9	119.70	0.46
24	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,300	3.8	119.26	0.46
25	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,400	3.7	118.77	0.45
26	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,500	3.6	118.24	0.44
27	140	3,666,376	3.47	3.80	219.92	3,600	3.5	117.68	0.43

Fuente: Elaboración propia

Los ritmos de producción seleccionados para el análisis de optimización del ROP se extraen del conjunto de escenarios previamente definidos y se presentan en la Tabla 29. Esta tabla sintetiza los principales indicadores financieros asociados a cada valor de ROP evaluado bajo el escenario de cut off óptimo correspondiente al caso C.

Tabla 29

Indicadores financieros para diferentes valores ROP's para cut off óptimo, caso C

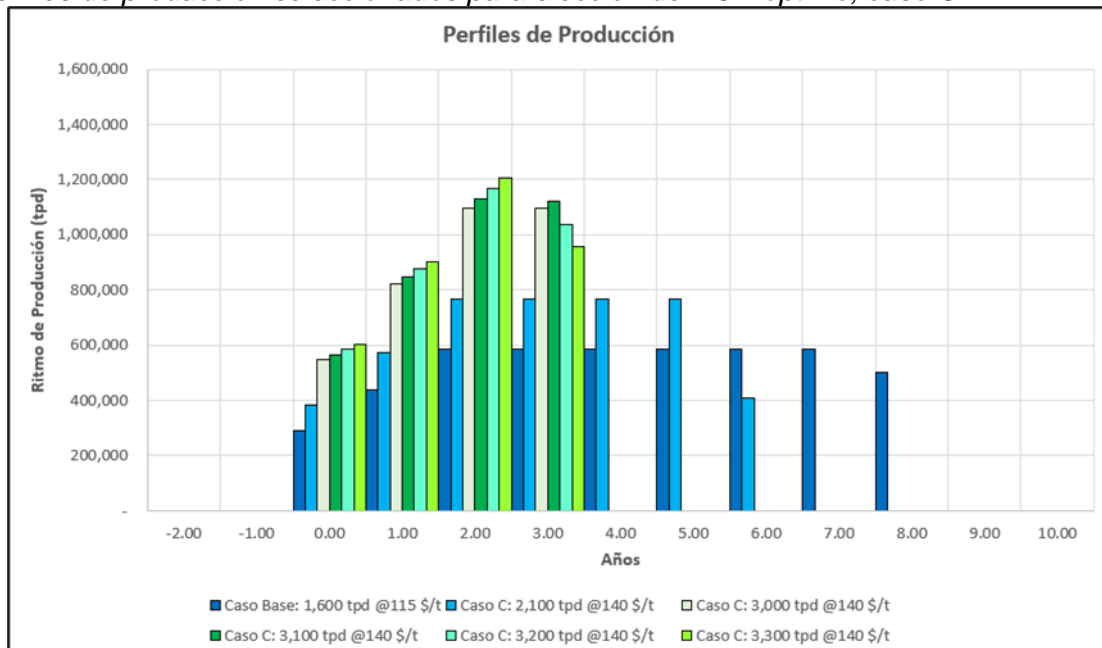
Ritmo de producción (tpd)	LOM (años)	CAPEX total (M US\$)	SUST. CAPEX anual (M US\$)	VAN (M US\$)	IVAN	TIR
2,100	5.5	206.4	4.2	115.68	0.56	25.1%
3,000	4.1	248.9	5.2	115.69	0.46	25.3%
3,100	4.0	253.2	5.2	120.10	0.47	25.9%
3,200	3.9	257.5	5.3	119.70	0.46	25.8%
3,300	3.8	261.7	5.5	119.26	0.46	25.8%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 29 se observa que los escenarios con ritmos de producción en el rango de 3,000 tpd a 3,300 tpd tienen un comportamiento financiero similar, y la Figura 70 muestra que los escenarios en ese rango tienen indicadores comparables en términos de producción, años de vida útil de la mina (LOM) y otros factores relevantes. Debido a esta similitud, el ritmo de producción de 3,100 tpd, que exhibe el mayor VAN dentro de este rango, se selecciona como el representante de estos escenarios para su comparación con el ritmo de producción de 2,100 tpd.

Figura 70

Perfiles de producción seleccionados para elección de ROP óptimo, caso C



Fuente: Elaboración propia

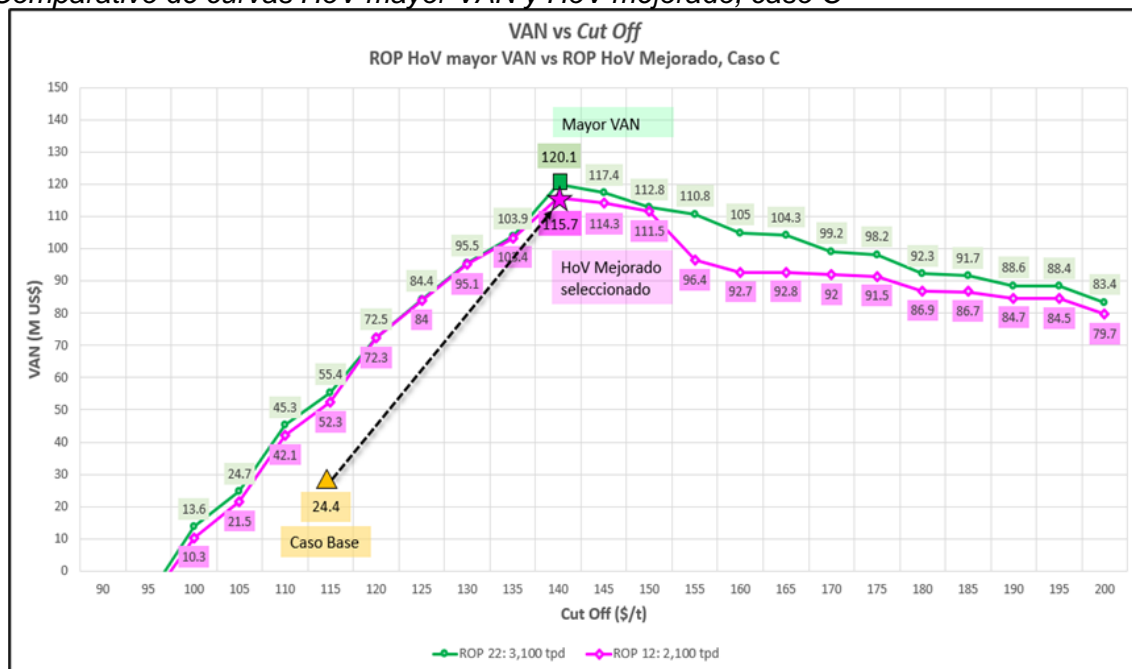
En la Tabla 29 y Figura 71, se observa que el ROP22 (3,100 tpd) genera el mayor VAN, con 120.1M US\$; no obstante, este incremento es de apenas el 4% (~4.5M US\$) en

comparación con el escenario ROP12 (2,100 tpd). A pesar de esto, el índice de Valor Actual Neto (IVAN) para el ROP12 de 2,100 tpd es superior. Esto se debe a que se realizara una inversión inicial para el ROP22 de 3,100 tpd significativamente mayor, aproximadamente ~46.8M US\$ más que el escenario de ROP de 2,100 tpd, para obtener solo el incremento marginal del 4% de VAN.

Asimismo, al analizar los valores de los indicadores financieros de los 783 escenarios (VAN vs IVAN) para los distintos escenarios del Caso C, como se observa en la Figura 72, se puede constatar que el ritmo de producción de 2,100 tpd presenta un IVAN superior en comparación con los demás escenarios, incluyendo el ritmo de producción de 3,100 tpd, a pesar de que este último exhibe un VAN más alto. Dado que las rentabilidades del ROP de 2,100 tpd y el de 3,100 tpd son similares, y considerando que el ritmo de producción de 2,100 tpd requiere un menor esfuerzo de recursos y una inversión inicial más baja, mientras que ambos generan valores similares de VAN y rentabilidad, el ritmo de producción de 2,100 tpd se perfila como la opción preferible en comparación con el de 3,100 tpd.

Figura 71

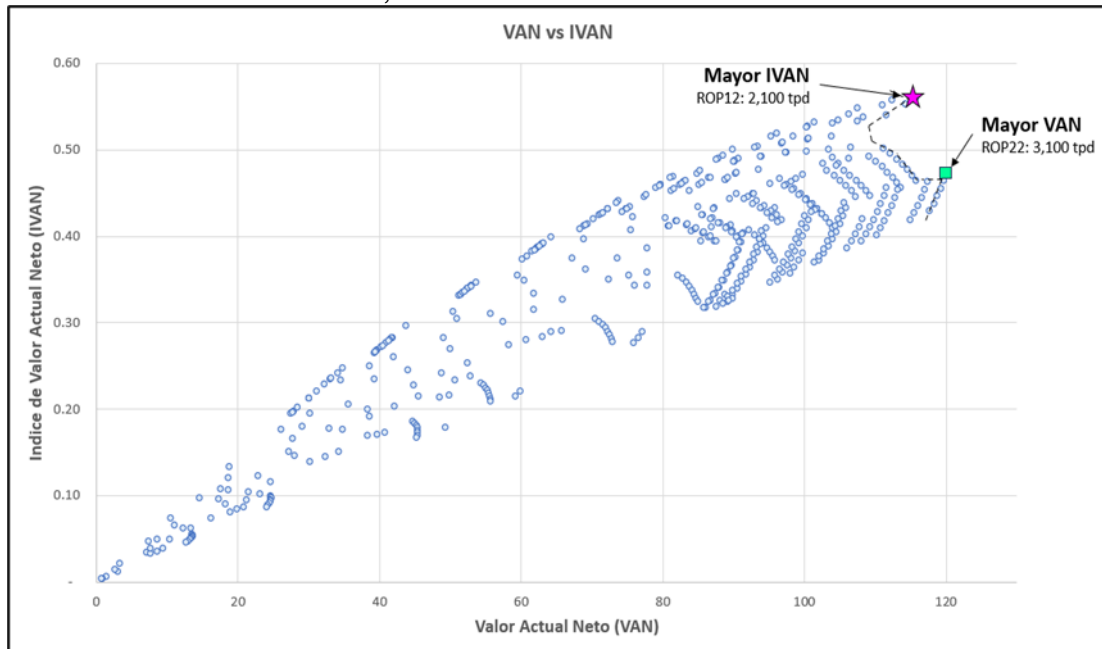
Comparativo de curvas HoV mayor VAN y HoV mejorado, caso C



Fuente: Elaboración propia

Figura 72

Ploteo de valores VAN vs IVAN, caso C

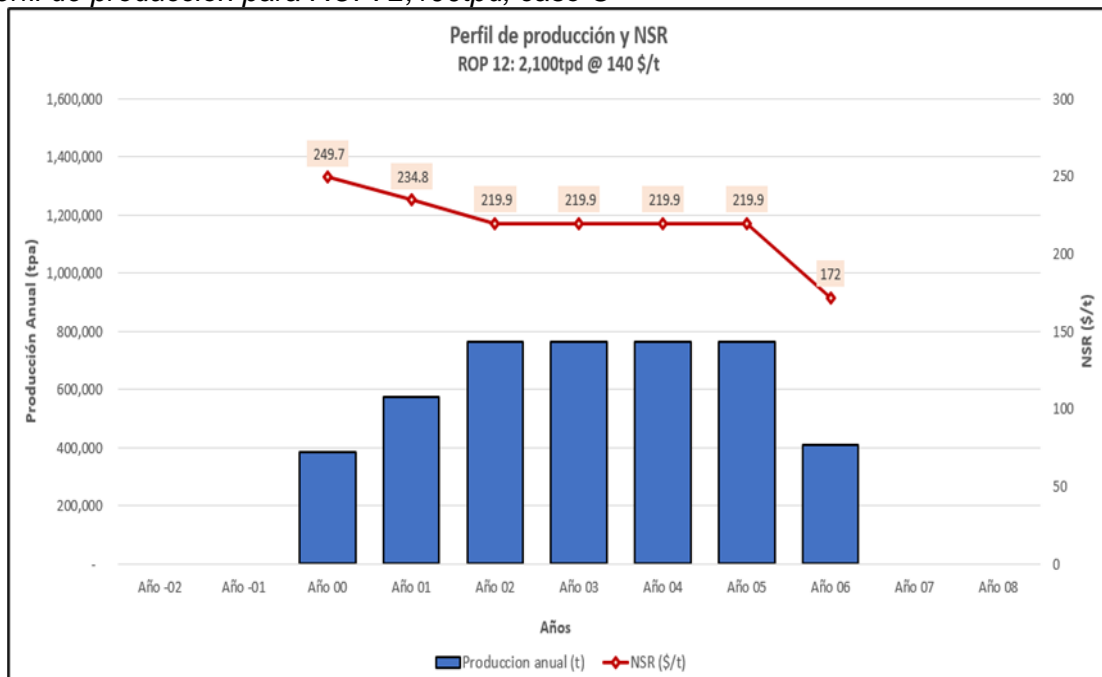


Fuente: Elaboración propia

Los perfiles de producción para los ritmos de producción de 2,100 tpd y 3,100 tpd, que han sido seleccionados para la obtención del ROP óptimo, se muestran en las Figuras 73 y 74.

Figura 73

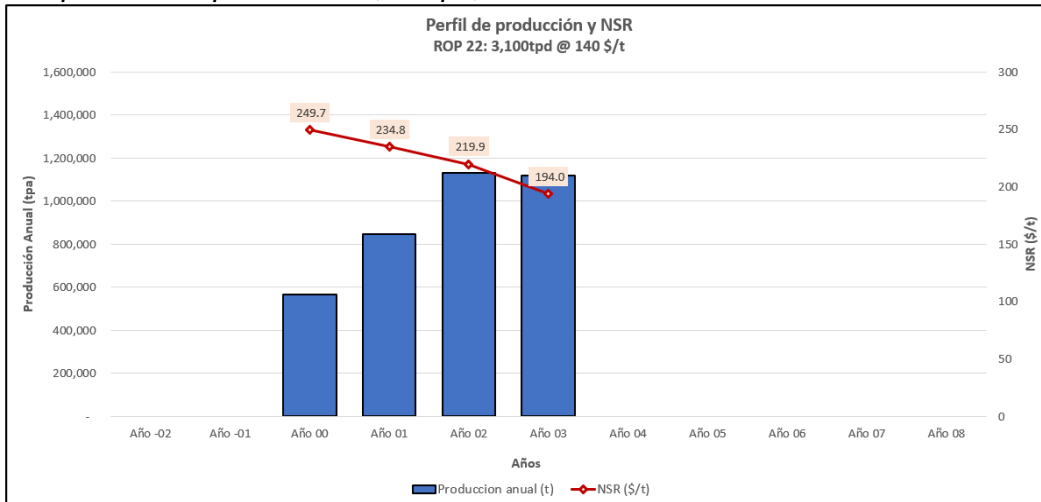
Perfil de producción para ROP: 2,100tpd, caso C



Fuente: Elaboración propia

Figura 74

Perfil de producción para ROP: 3,100tpd, caso C

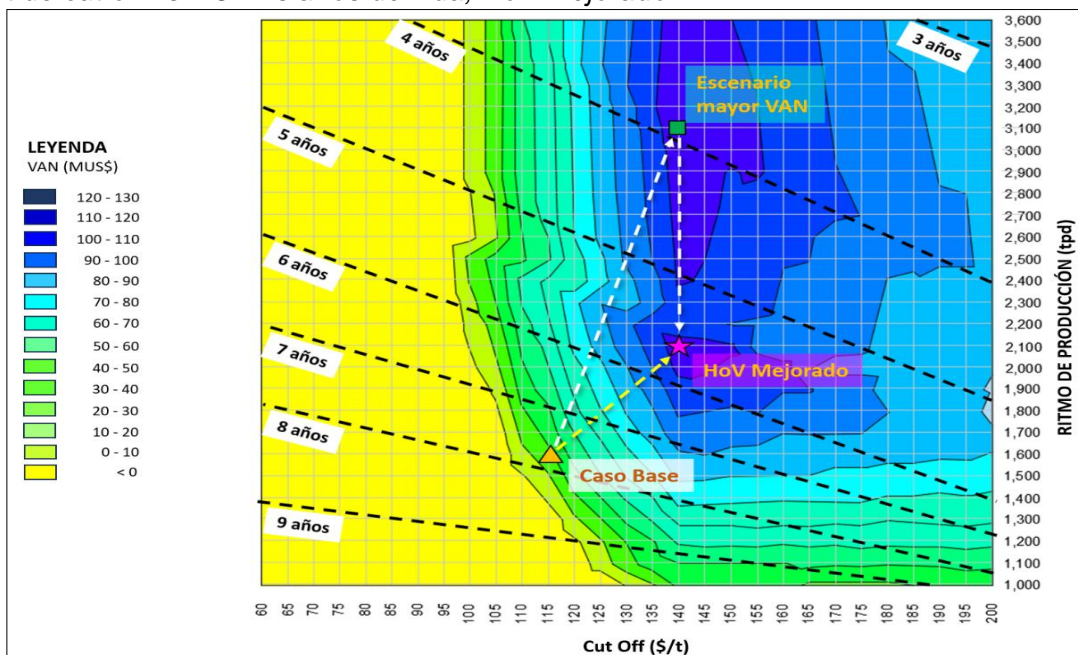


Fuente: Elaboración propia

Continuando con el análisis de selección del ROP, los perfiles de producción mostrados en la Figura 75 indica que un ritmo de producción de 2,100 tpd proporciona una mayor estabilidad al proyecto, ya que se extiende a lo largo de 5.5 años de LOM. En contraste, un ritmo de producción de 3,100 tpd reduciría la vida útil de la mina a 3.9 años. Esta diferencia en la duración del LOM contribuye a una mayor estabilidad en el proyecto con el ritmo de producción de 2,100 tpd.

Figura 75

Plot de cut off vs ROP vs años de vida, HoV mejorado



Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Aplicación del modelo estocástico para decisión de ritmo de producción

La aplicación del modelo estocástico en la toma de decisiones para el ritmo de producción permite incorporar la incertidumbre inherente en las variables económicas del proyecto minero de la presente tesis. En esta sección, se describe como se integraron las distribuciones de probabilidad de las variables independientes al flujo de caja determinístico, lo que permitió obtener una distribución de probabilidad para el VAN del proyecto.

4.3.5.1 Distribuciones ajustadas de variables independientes. Se presentan en la Tabla 30 las distribuciones de probabilidad obtenidas para las variables clave, las cuales fueron ajustadas utilizando datos estadísticos reales. El ajuste de estas distribuciones se realizó considerando un consenso entre el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información bayesiano (BIC), el estadístico Chi-Cuadrado, el estadístico Kolmogorov-Smimov y el estadístico Anderson-Darling, lo que asegura una representación precisa del comportamiento de cada variable. Las determinaciones de las distribuciones para las variables y simulaciones se llevaron a cabo en el software @Risk, proporcionando un análisis robusto de las incertidumbres presentes en el proyecto.

Tabla 30

Consenso para selección de distribución de probabilidad ajustada de cada variable

Variable	AIC	BIC	Chi-cuadrado	K-S	A-D	Consenso
Tonelaje Producción (t)	Triang	Triang	Triang	ExtValue Min	Triang	Triang
Precio de Au (US\$/oz)	ExtValue Min	LogLogistic	LogLogistic	ExtValue Min	ExtValue Min	ExtValue Min
Ley de Au (oz/t)	LogLogistic	ExtValue Min	LogLogistic	LogLogistic	LogLogistic	LogLogistic
Ley de Ag (oz/t)	Normal	ExtValue Min	Normal	Normal	Normal	Normal
Dilución (%)	LogNormal	LogNormal	LogLogistic	LogLogistic	LogLogistic	LogNormal
OPEX Unitario (US\$/t)	Triang	Triang	Triang	ExtValue Min	Triang	Triang
CAPEX (M US\$)	Triang	Triang	Triang	ExtValue Min	Triang	Triang
Sustaining CAPEX (M US\$)	Triang	Triang	Triang	ExtValue Min	Triang	Triang

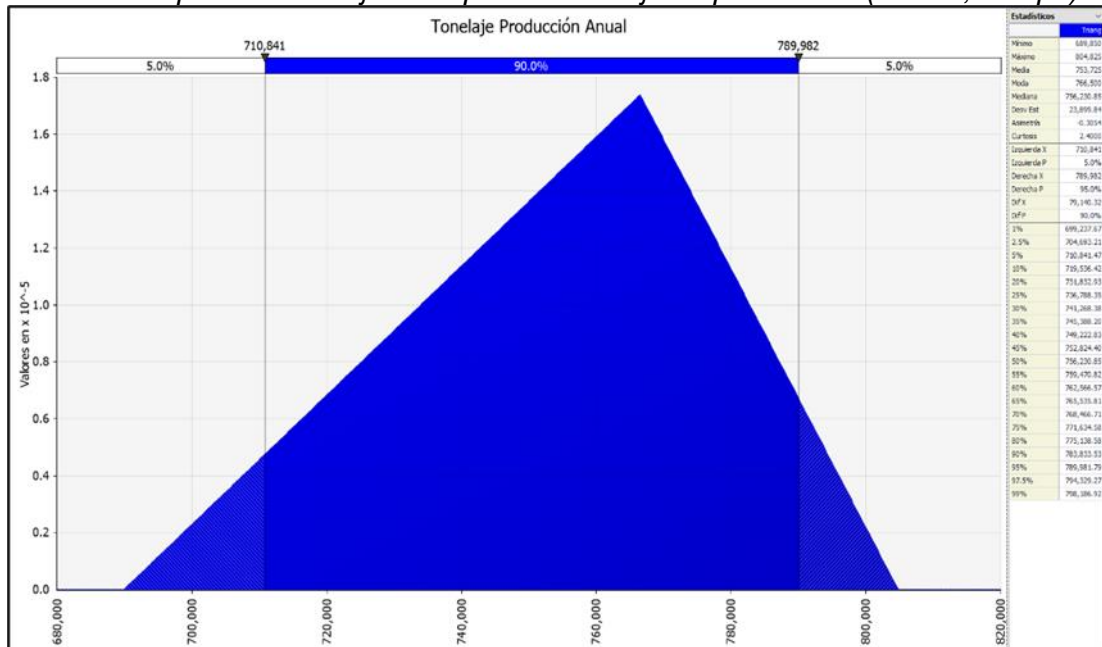
Fuente: Elaboración propia

El detalle de información de cada una de las distribuciones de probabilidad de las variables independientes:

4.3.5.1.1 Tonelaje de producción anual (t). La variable de producción anual de mineral se ajustará a una distribución Triangular, variable que estará en el rango de valores entre 90% al 105% del valor del ritmo de producción del caso en evaluación. Por ejemplo, para el ritmo de producción de 2,100tpd o 766,500tpa, el rango de valores entre 689,850 tpa y 804,825 tpa, el valor promedio es de 753,725tpa y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +-39,570tpa (108tpd). Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 710,840tpa y 789,982tpa. El valor con mayor frecuencia es de 766,500tpa, su mediana o percentil 50 es de 756,230tpa, su desviación estándar de 23,899tpa, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 76

Distribución de probabilidad ajustada para el tonelaje de producción (ROP:2,100 tpd)



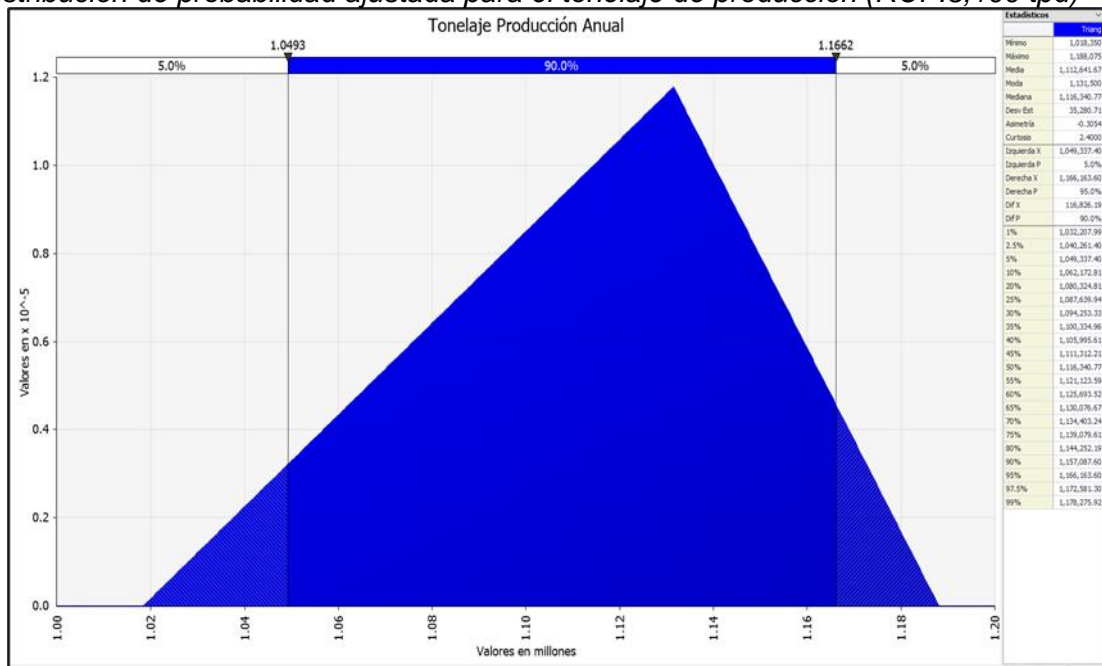
Fuente: Elaboración propia

Para el ritmo de producción de 3,100tpd o 1,131,500tpa, el rango de valores entre 1,018,350tpa y 1,188,075tpa, el valor promedio es de 1,112,641tpa y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +-58,450tpa (160tpd). Además,

tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 1,049,300 tpa y 1,166,7200tpa. El valor con mayor frecuencia es de 1,131,500tpa, su mediana o percentil 50 es de 1,116,340tpa, su desviación estándar de 35,280tpa, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 77

Distribución de probabilidad ajustada para el tonelaje de producción (ROP:3,100 tpd)

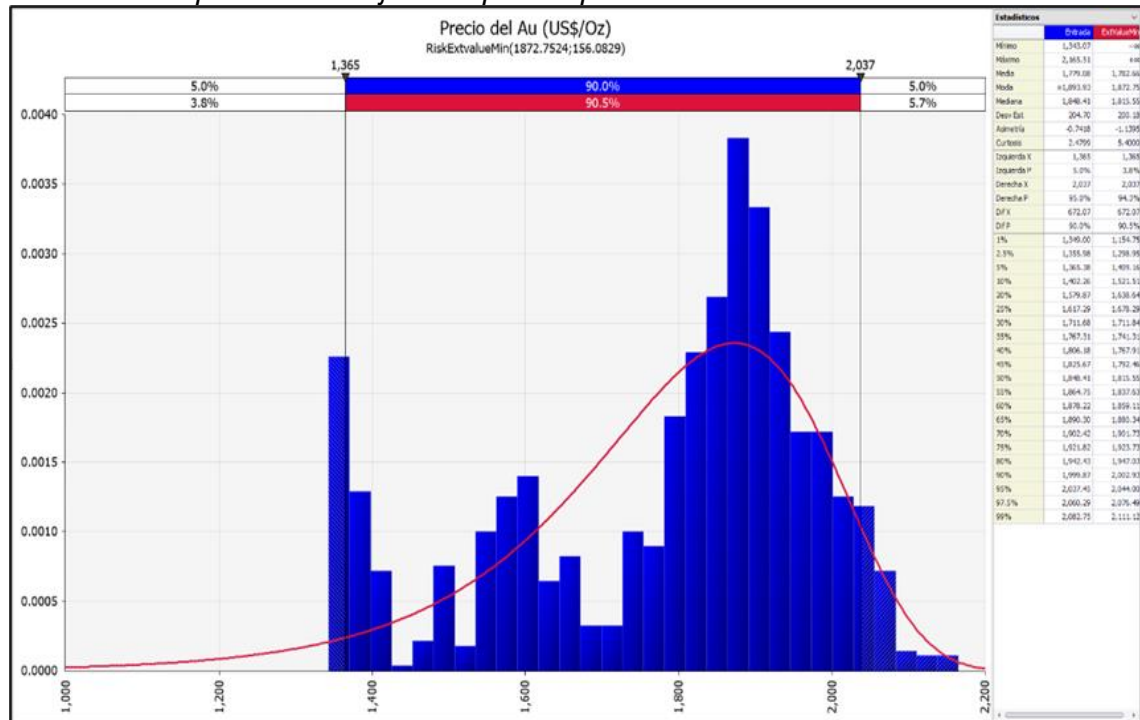


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.2 Precio del metal de Au y Ag (US\$/oz). La variable del precio del metal Au se ajusta a una distribución Extreme Minimum Value, basado en las cotizaciones históricas de los últimos 5 años y de las proyecciones de los siguientes 02 años de este metal. Los valores del precio de Au se encuentran en un rango de valores entre 1,343 US\$/oz y 2,165 US\$/oz, y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +336 US\$/oz. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 1,365 US\$/oz y 2,037 US\$/oz. El valor con mayor frecuencia es de 1,872 US\$/oz, su mediana o percentil 50 es de 1,815 US\$/oz, su desviación estándar de 200 US\$/oz, su asimetría es negativa con un valor de -1.13 y finalmente su curtosis es de 5.4 indicando que consta de una alta concentración de datos en la zona central.

Figura 78

Distribución de probabilidad ajustada para el precio del Au



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para la variable del precio del metal Ag, se debe tener en cuenta que existe correlación positiva razonable fiel a la realidad. entre el precio del Au y Ag. En base a las cotizaciones de los metales se generó un ratio “cotización metal Au/cotización metal Ag”, el cual permitirá obtener un valor de 78.83 para estimar la cotización del metal Ag conforme se generen los distintos valores del metal Au en la simulación, tal como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31

Ratio “cotización metal Au/ cotización metal Ag”

METAL / METAL	Au	Ag
Au	1.00	78.83
Ag	-	1.00

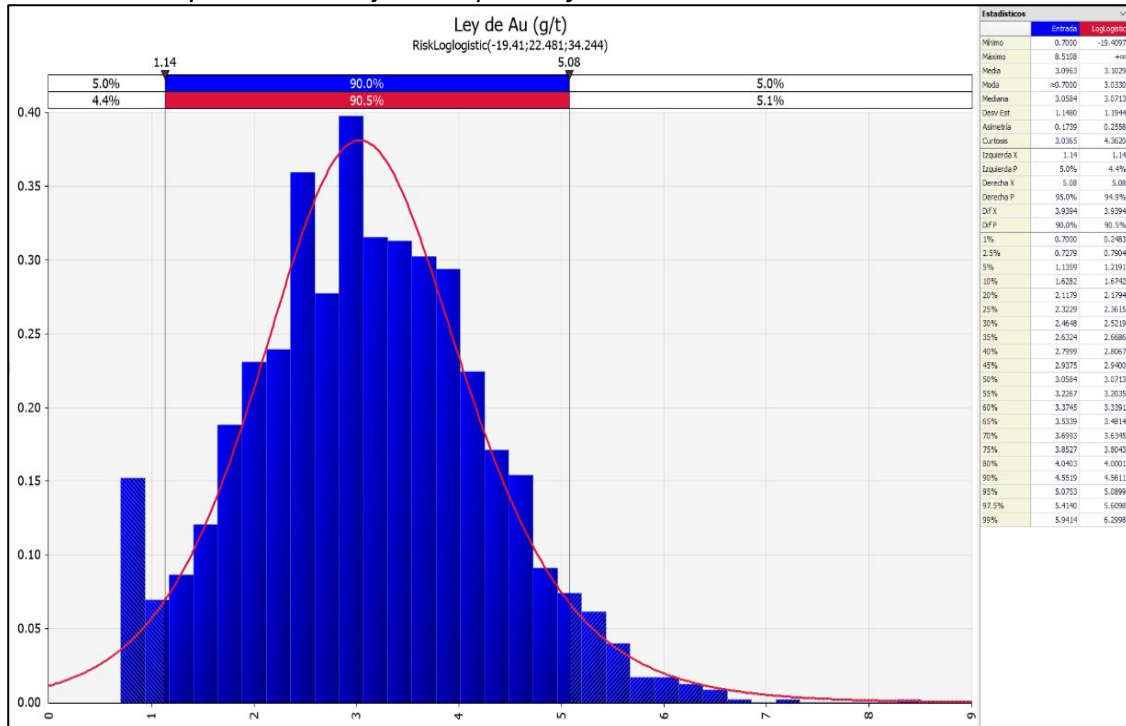
Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.3 Ley de Au (g/t). La variable de ley de Au se ajusta a una distribución LogLogistic, con un rango de valores entre 0.70 g/t y 8.51 g/t, el valor promedio es de 3.10 g/t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +1.97 g/t. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 1.14 g/t

y 5.08 g/t. El valor con mayor frecuencia es de 3.03 g/t, su mediana o percentil 50 es de 3.07 g/t, su desviación estándar de 1.19 g/t, su asimetría es negativa con un valor de +0.25 y finalmente su curtosis es de 4.36 indicando que consta de una alta concentración de datos en la zona central.

Figura 79

Distribución de probabilidad ajustada para ley de Au

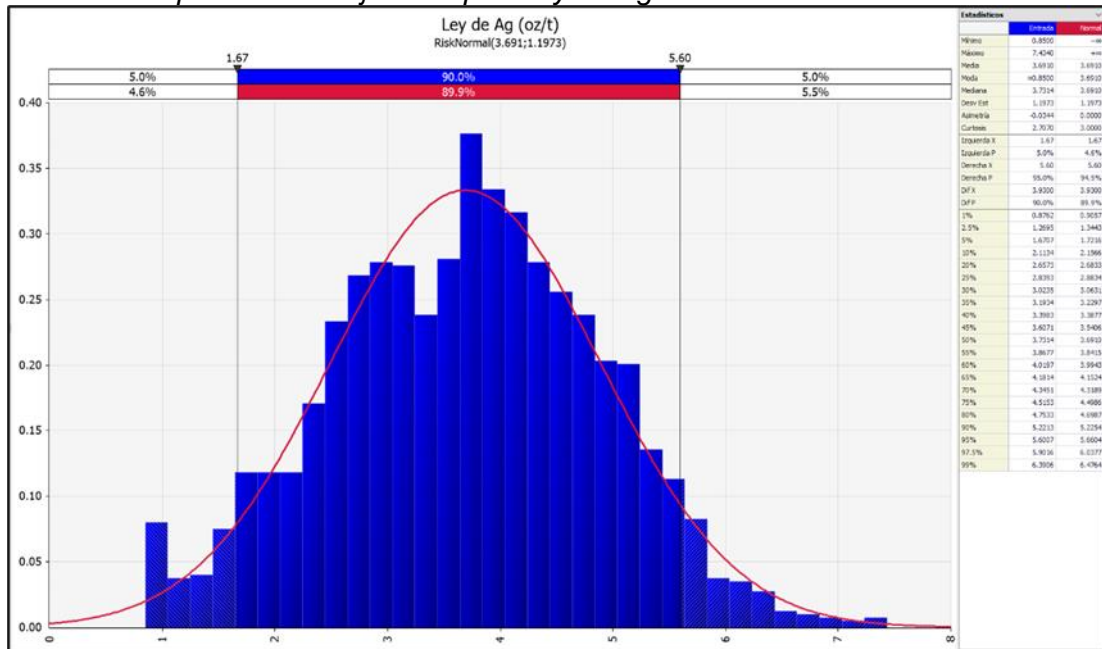


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.4 Ley de Ag (oz/t). La variable de ley de Ag se ajusta a una distribución Normal, con un rango de valores entre 0.85 oz /t y 7.43 oz/t, el valor promedio es de 3.69 oz/t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +-1.96 oz/t. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 1.67 oz/t y 5.60 oz/t. El valor con mayor frecuencia es de 3.69 oz/t, su mediana o percentil 50 es de 3.69 oz/t, su desviación estándar de 1.19 oz/t, y finalmente su curtosis es de 3.00 indicando que consta de una concentración intermedia de datos en la zona central.

Figura 80

Distribución de probabilidad ajustada para ley de Ag

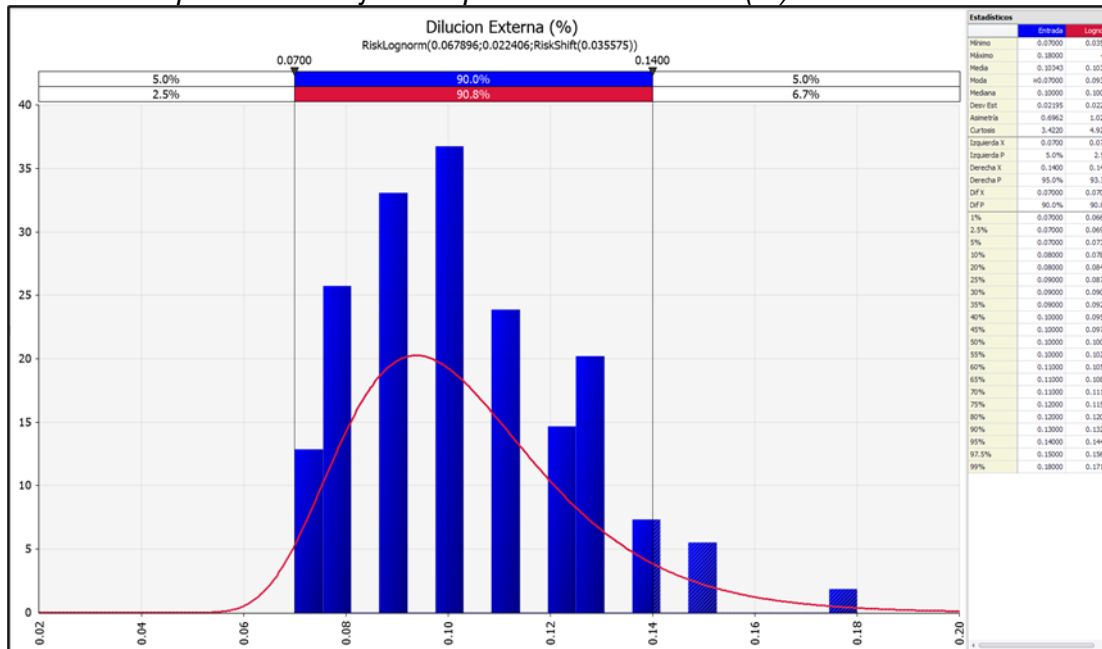


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.5 Dilución externa (%). La variable dilución externa se ajusta a una distribución LogNormal, con un rango de valores entre 7.00% y 18.00%, el valor promedio es de 10.34% y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- 3.50%. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 7.00% y 14.00%. El valor con mayor frecuencia es de 9.37%, su mediana o percentil 50 es de 10.00%, su desviación estándar de 2.24%, su asimetría es positiva con un valor de 1.02 y finalmente su curtosis es de 4.92 indicando que consta de una alta concentración de datos en la zona central.

Figura 81

Distribución de probabilidad ajustada para dilución externa (%)

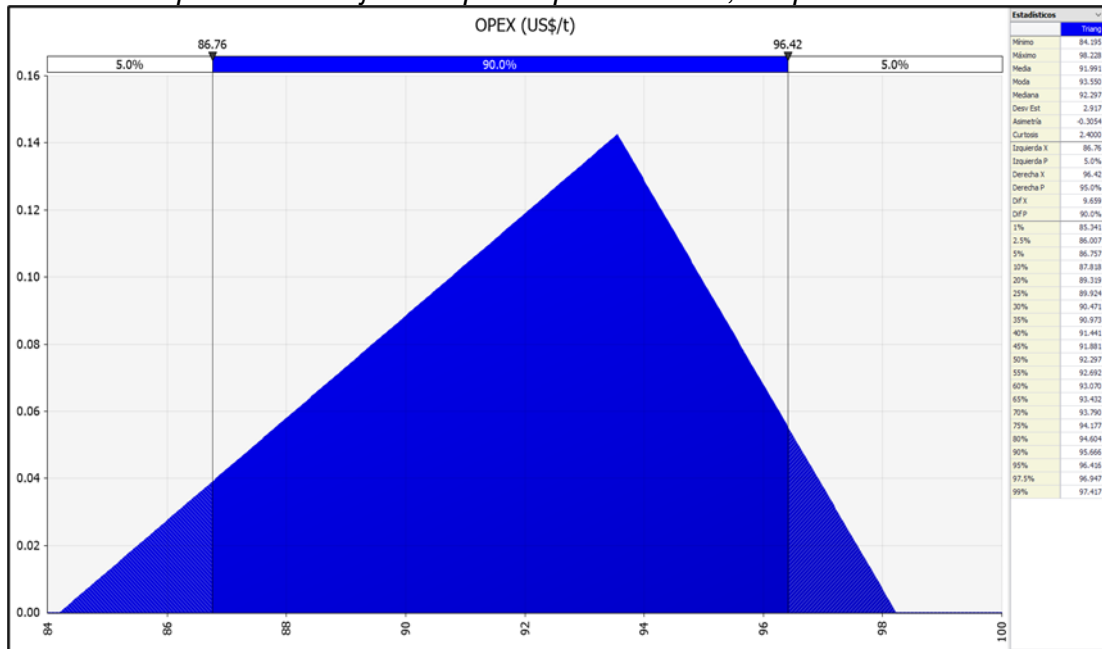


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.6 OPEX (US\$/t). La variable Opex se ajustará a una distribución Triangular. La variable de costo operativo unitario Opex estará en el rango de valores entre 90% al 105% del valor de Opex del caso en evaluación. Por ejemplo, para el ritmo de producción de 2,100 tpd el Opex es de 104.58 US\$/t, y el rango de valores entre 94.12 US\$/t y 109.81 US\$/t, el valor promedio es de 102.84 US\$/t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +-5.39 US\$/t. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 96.99 US\$/t y 107.78 US\$/t. El valor con mayor frecuencia es de 104.58 US\$/t, su mediana o percentil 50 es de 103.18 US\$/t, su desviación estándar de 3.26 US\$/t, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 82

Distribución de probabilidad ajustada para Opex al ROP:2,100tpd

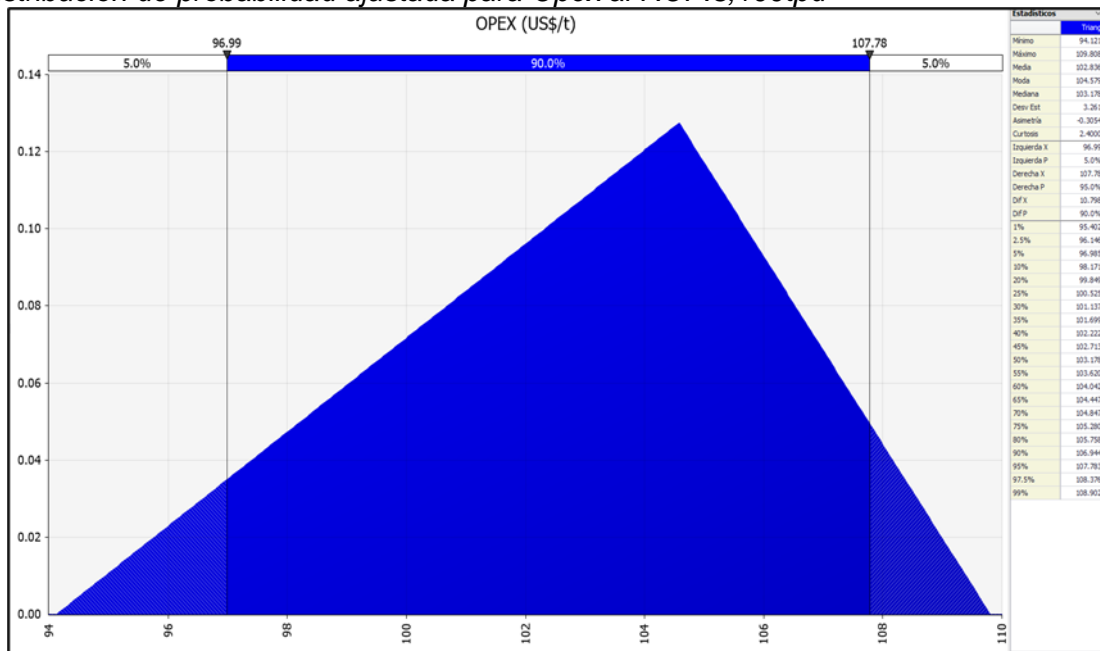


Fuente: Elaboración propia

Para el ritmo de producción de 3,100 tpd el Opex es de 93.55 US\$/t, y el rango de valores entre 84.19 US\$/t y 98.22 US\$/t, el valor promedio es de 91.99 US\$/t y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +/-4.83 US\$/t. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre 86.76 US\$/t y 96.42 US\$/t. El valor con mayor frecuencia es de 93.55 US\$/t, su mediana o percentil 50 es de 92.29 US\$/t, su desviación estándar de 2.92 US\$/t, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 83

Distribución de probabilidad ajustada para Opex al ROP:3,100tpd

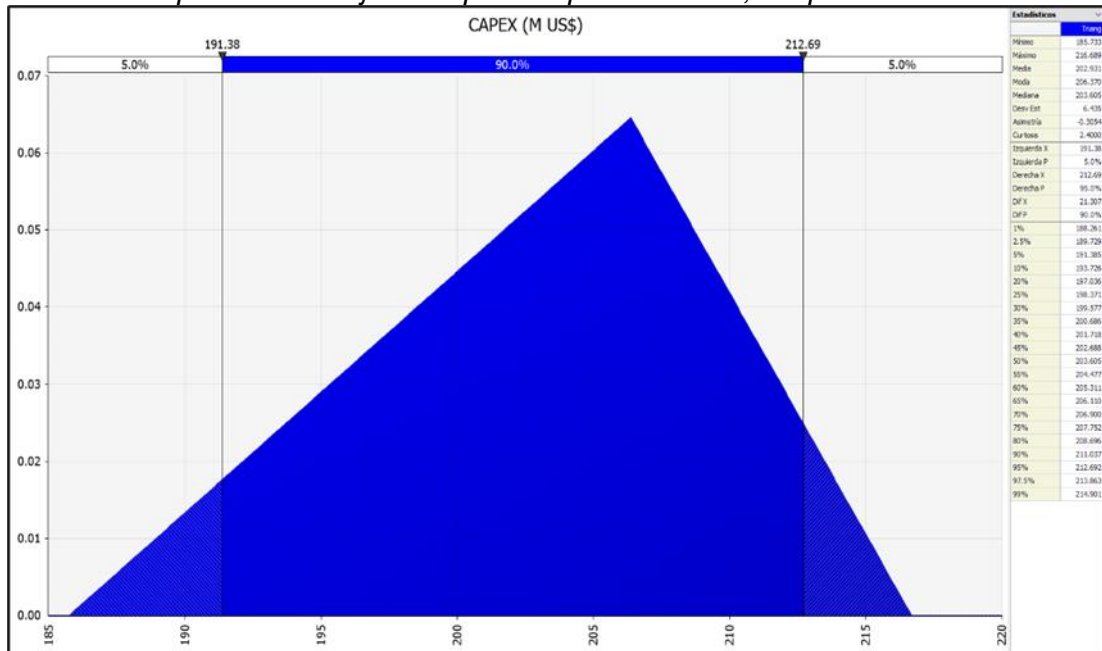


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.7 CAPEX (M US\$). La variable de CAPEX se ajustará a una distribución Triangular. La variable de inversión de capital Capex estará en el rango de valores entre 90% al 105% del valor de Capex del caso en evaluación. Por ejemplo, para el ritmo de producción de 2,100 tpd el Capex es de US\$ 206.37M, y el rango de valores entre US\$ 185.73M y US\$ 216.69M, el valor promedio es de US\$ 202.93M y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- US\$ 21.31M. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$ 191.38M y US\$ 212.69M. El valor con mayor frecuencia es de US\$ 206.37M, su mediana o percentil 50 es de US\$ 203.61M, su desviación estándar de US\$ 6.43M, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 84

Distribución de probabilidad ajustada para Capex al ROP:2,100tpd

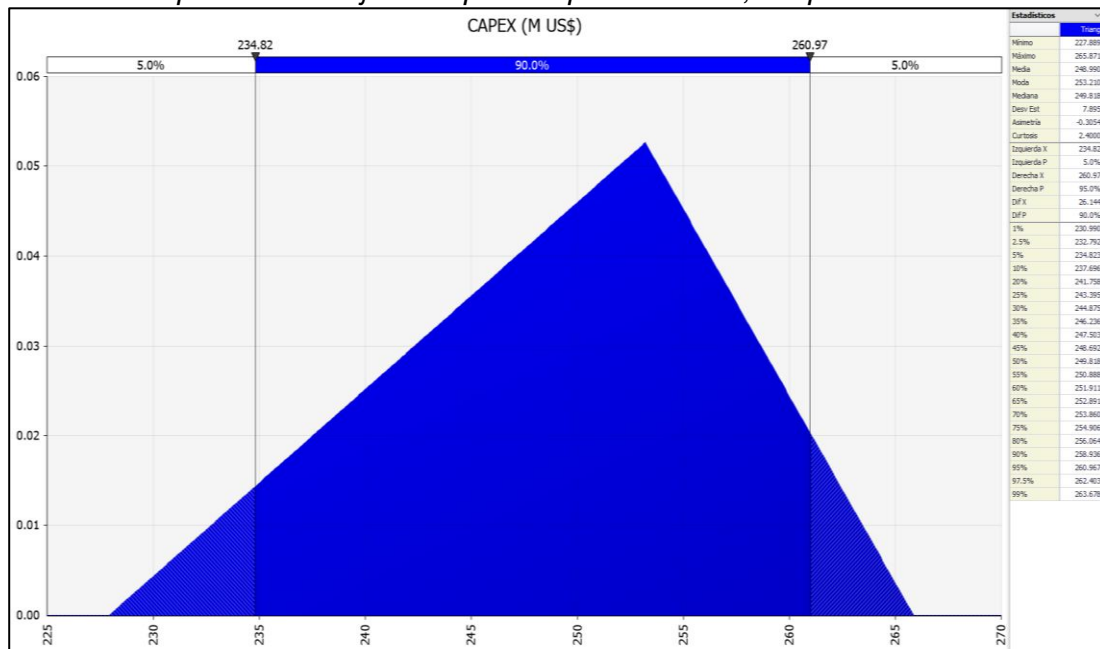


Fuente: Elaboración propia

Para el ritmo de producción de 3,100 tpd el Capex es de US\$ 253.21M, y el rango de valores entre US\$ 227.89M y US\$ 265.87M, el valor promedio es de US\$ 248.99M y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- US\$ 13.07M. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$ 234.82M y US\$ 260.97. El valor con mayor frecuencia es de US\$ 253.21M, su mediana o percentil 50 es de US\$ 249.82M, su desviación estándar de US\$ 7.89M, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 85

Distribución de probabilidad ajustada para Capex al ROP:3,100tpd

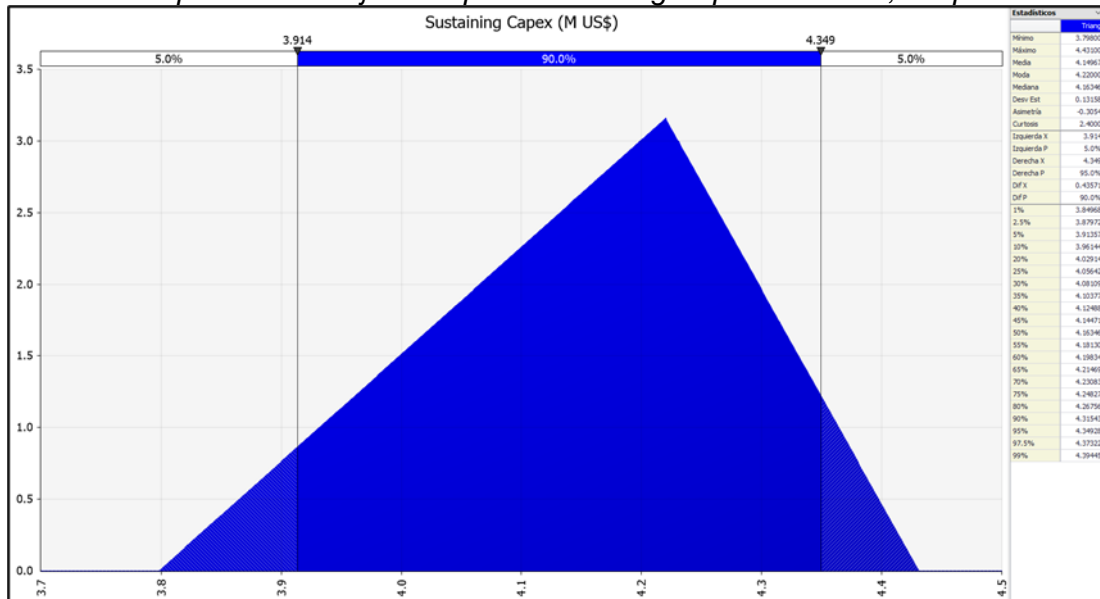


Fuente: Elaboración propia

4.3.5.1.8 Sustaining CAPEX (M US\$). La variable Sustaining Capex se ajustará a una distribución Triangular. La variable de inversión de sostenimiento anual Sustaining Capex estará en el rango de valores entre 90% al 105% del valor de Sustaining Capex del caso en evaluación. Por ejemplo, para el ritmo de producción de 2,100 tpd el Sustaining Capex es de US\$ 4.22M (suma de valores Sustaining Capex mina y planta), y el rango de valores entre US\$ 3.79M y US\$ 4.43M, el valor promedio es de US\$ 4.15M y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- US\$ 0.21M. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$ 3.91M y US\$ 4.34M. El valor con mayor frecuencia es de US\$ 4.22M, su mediana o percentil 50 es de US\$ 4.16M, su desviación estándar de US\$ 0.13M, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 86

Distribución de probabilidad ajustada para Sustaining Capex al ROP:2,100tpd

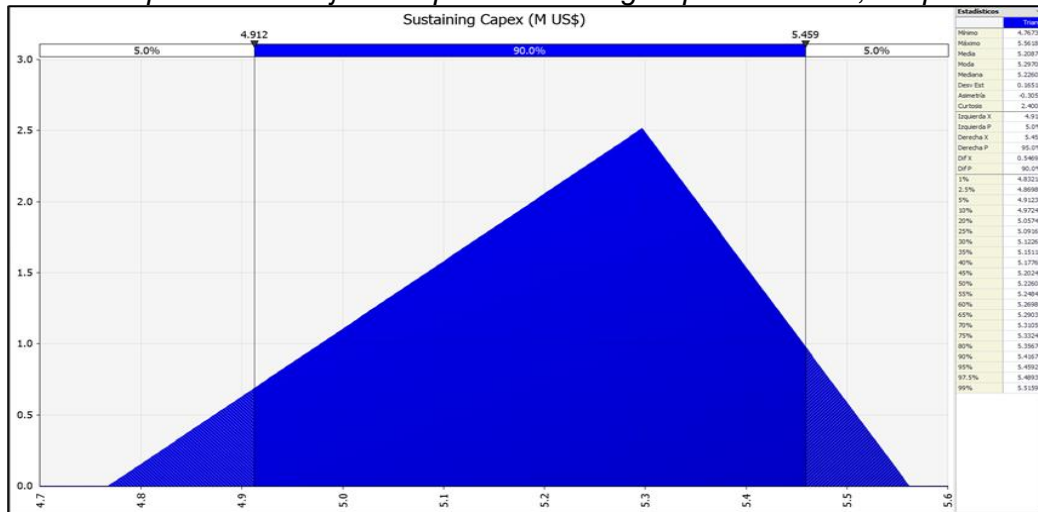


Fuente: Elaboración propia

Para el ritmo de producción de 3,100 tpd el Sustaining Capex es de US\$ 5.29M (suma de valores Sustaining Capex mina y Sustaining Capex planta), y el rango de valores entre US\$ 4.77M y US\$ 5.56M, el valor promedio es de US\$ 5.21M y a un intervalo de confianza de 90% tiene un valor en torno a su media de +- US\$ 0.27M. Además, tiene el 90% de probabilidad que los valores aleatoriamente estén entre US\$ 4.91M y US\$ 5.45M. El valor con mayor frecuencia es de US\$ 5.29M, su mediana o percentil 50 es de US\$ 5.22M, su desviación estándar de US\$ 0.16M, su asimetría es negativa con un valor de -0.30 y finalmente su curtosis es de 2.4 indicando que consta de una baja concentración de datos en la zona central.

Figura 87

Distribución de probabilidad ajustada para Sustaining Capex al ROP:3,100tpd



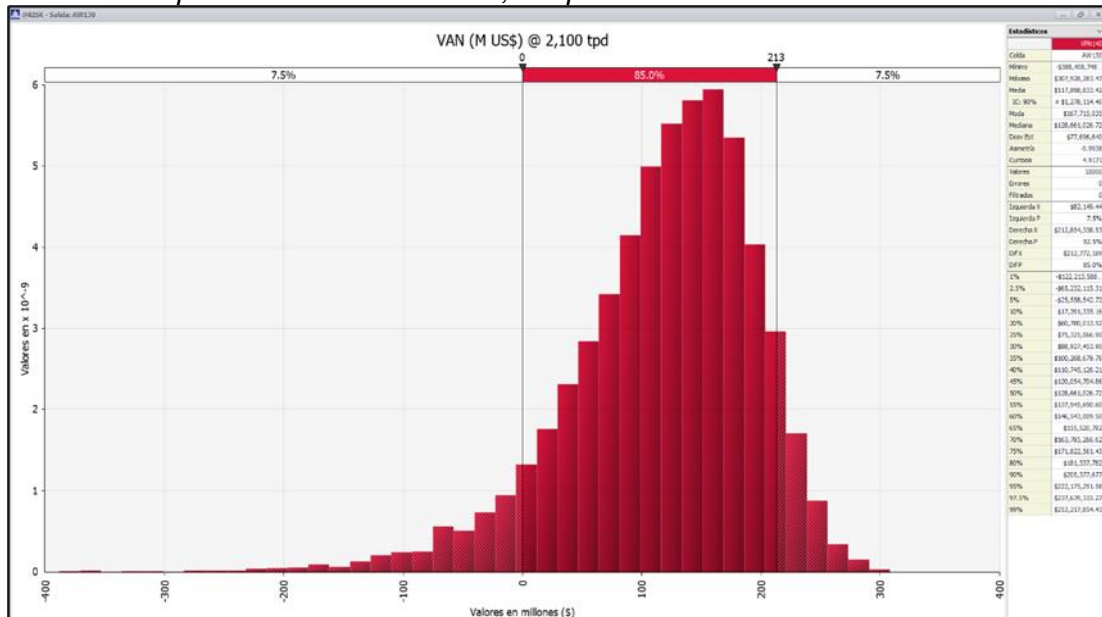
Fuente: Elaboración propia

Luego de presentar las variables clave en el análisis económico del proyecto, se procede a la etapa de simulación de escenarios bajo diferentes ritmos de producción. El objetivo de esta sección es evaluar el comportamiento de los indicadores financieros al aplicar el método de análisis de riesgo a través de herramientas especializadas. En este contexto, la simulación mediante el software @Risk permite estimar la variabilidad y el desempeño de los ritmos de producción seleccionados (2,100 tpd y 3,100 tpd), proporcionando un marco robusto para la toma de decisiones. Los resultados obtenidos constituyen una base sólida para comparar los escenarios y determinar el ritmo de producción óptimo.

4.3.5.2 Simulación para ritmo de producción: 2,100 tpd. En esta sección se presenta la simulación realizada para el ritmo de producción de 2,100 tpd, utilizando el método estocástico previamente ajustado. Para este ritmo de producción se obtuvo un VAN esperado US\$ 107.89M, por debajo del VAN determinístico (US\$ 115.68M) en US\$ 7.8M. Además, existe una probabilidad de 85% que los resultados del VAN sean positivos y se encuentren en el rango de US\$ 0M y US\$ 213M con una desviación estándar de US\$ 77.69M. Finalmente, se puede observar que existe la posibilidad de 7.5% que el VAN del proyecto sea negativo y existe una probabilidad de 58% de poder superar el VAN Base del ritmo de producción (US\$115.68M).

Figura 88

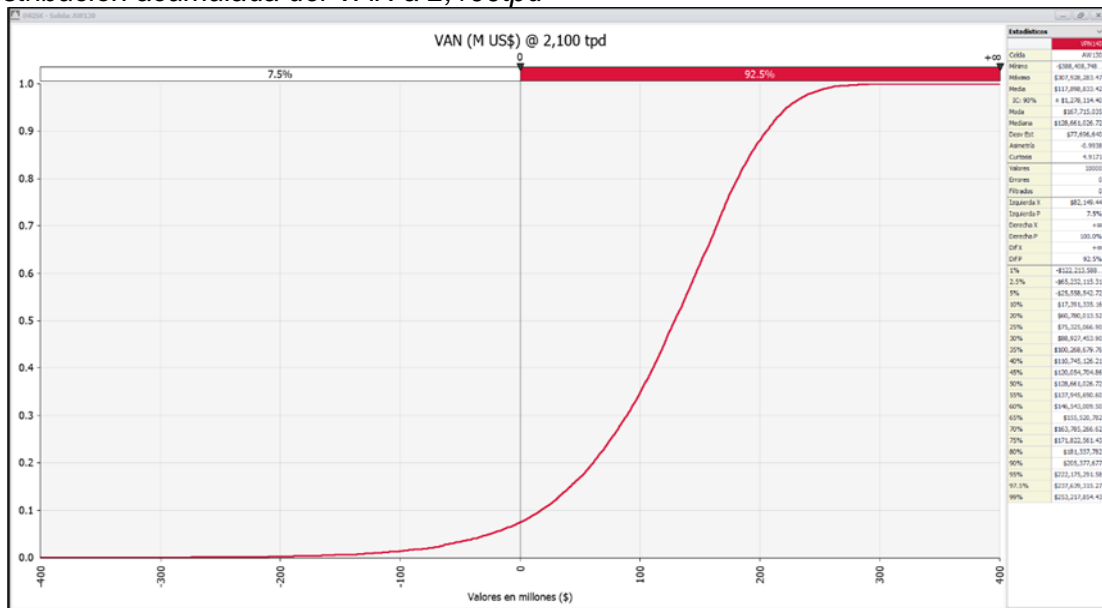
Distribución de probabilidad del VAN a 2,100tpd



Fuente: Elaboración propia

Figura 89

Distribución acumulada del VAN a 2,100tpd



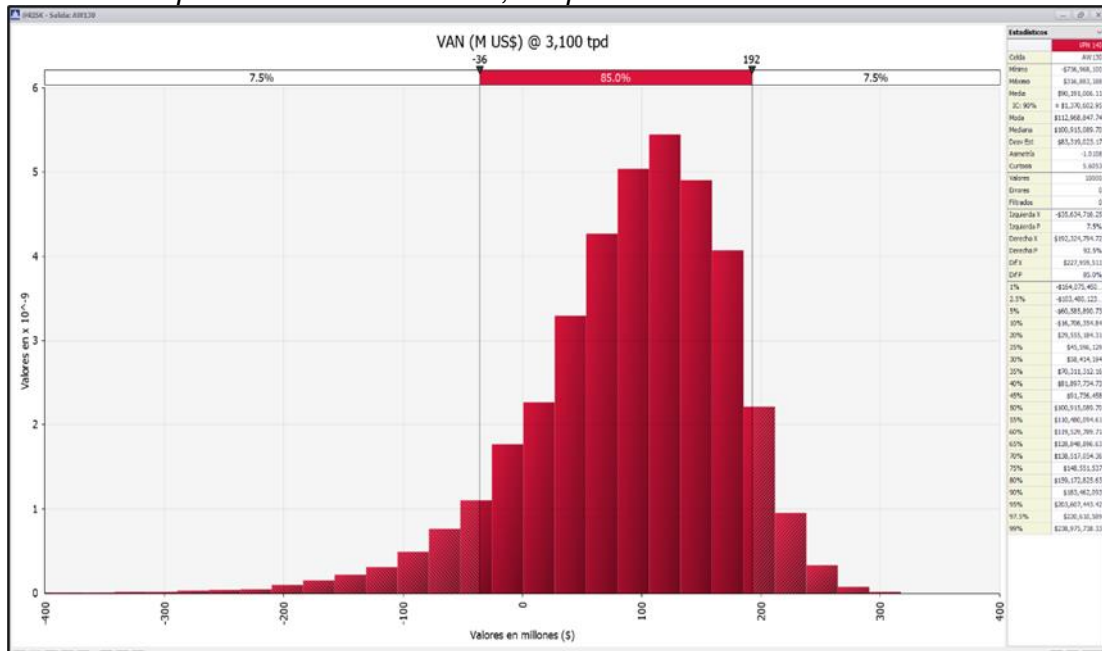
Fuente: Elaboración propia

4.3.5.3 Simulación para ritmo de producción: 3,100 tpd. En esta sección se presenta la simulación realizada para el ritmo de producción de 2,100 tpd, utilizando el método estocástico previamente ajustado. Para este ritmo de producción se obtuvo un VAN esperado US\$ 90.19M, por debajo del VAN determinístico (US\$ 120.10M) en US\$ 29.9M. Además, existe una probabilidad de 85% que los resultados del VAN estén entre

US\$ -36M y US\$ 192M con una desviación estándar de US\$ 83.32M. Finalmente, se puede observar que existe la posibilidad de 13.2% que el VAN del proyecto sea negativo y existe una probabilidad de 39% de poder superar el VAN Base del ritmo de producción (US\$115.68M).

Figura 90

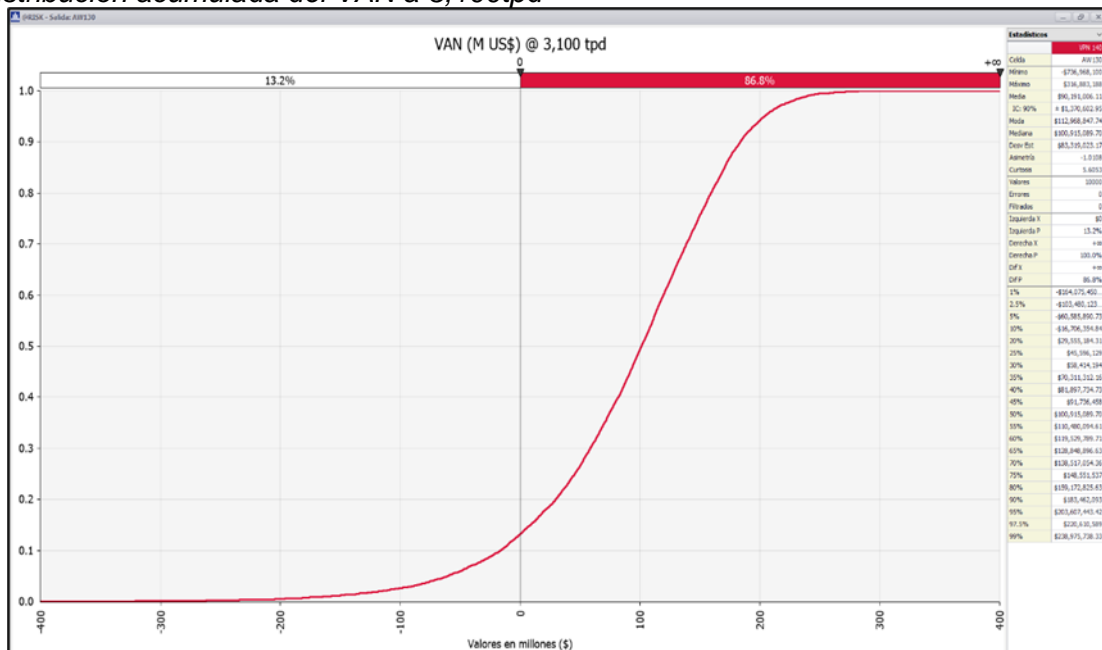
Distribución de probabilidad del VAN a 3,100tpd



Fuente: Elaboración propia

Figura 91

Distribución acumulada del VAN a 3,100tpd



Fuente: Elaboración propia

4.3.5.4 Evaluación de perfiles de riesgo para selección del ritmo de producción. Como se explicó en el capítulo anterior, obteniendo la distribución de probabilidad acumulada ($P(X)$) de la variable TIR (%) al generar la simulación Montecarlo; se puede obtener la distribución de probabilidad acumulada de riesgo ($R(X) = 1 - P(X)$) de los ritmos de producción 2,100 tpd y 3,100 tpd. Los perfiles de riesgo resultantes para la variable TIR (%) se presentan en la Tabla 32. Esta información permite evaluar la probabilidad acumulada de incurrir en riesgos asociados a cada ritmo de producción, facilitando la selección del ritmo óptimo basado en el perfil de riesgo deseado.

Tabla 32

Probabilidades de riesgo para los ritmos de producción en evaluación

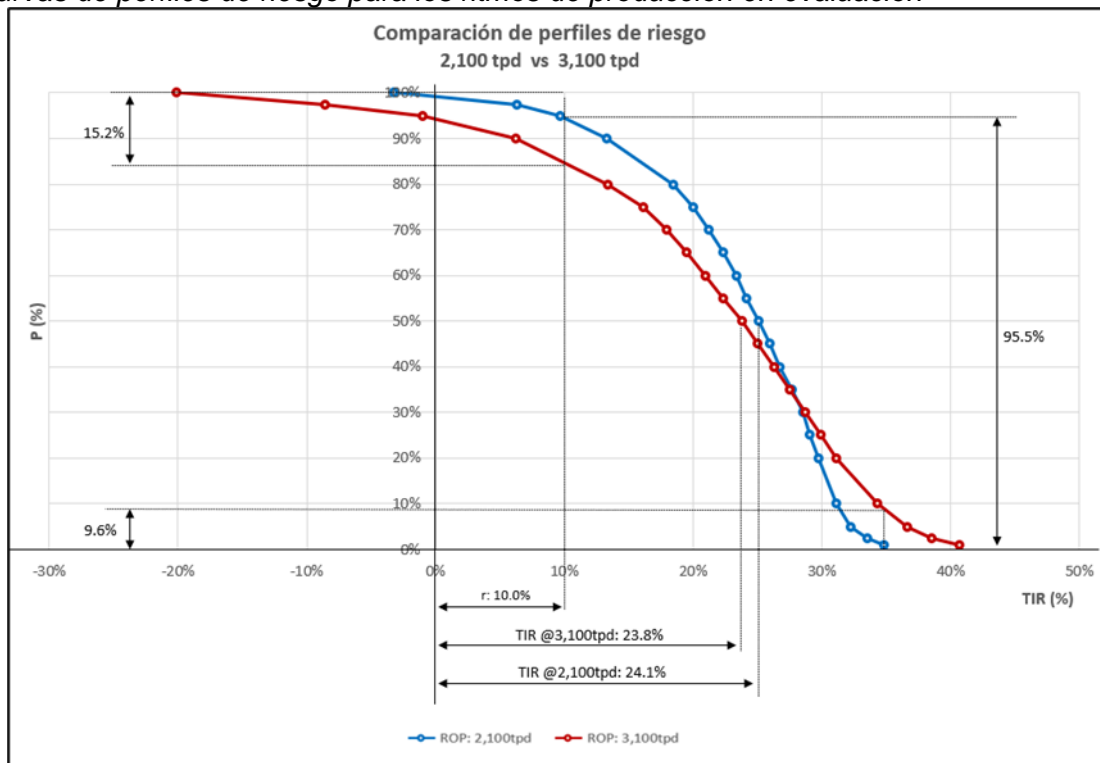
P(x)	R(x)	TIR (%) @ 2,100tpd	TIR (%) @ 3,100tpd
1.00%	99.00%	-3.28%	-20.10%
2.50%	97.50%	6.33%	-8.62%
5.00%	95.00%	9.65%	-1.05%
10.00%	90.00%	13.25%	6.27%
20.00%	80.00%	18.42%	13.40%
25.00%	75.00%	20.00%	16.13%
30.00%	70.00%	21.23%	17.93%
35.00%	65.00%	22.32%	19.48%
40.00%	60.00%	23.34%	20.96%
45.00%	55.00%	23.94%	22.36%
50.00%	50.00%	24.14%	23.81%
55.00%	45.00%	25.92%	25.05%
60.00%	40.00%	26.76%	26.29%
65.00%	35.00%	27.67%	27.47%
70.00%	30.00%	28.50%	28.70%
75.00%	25.00%	29.05%	29.92%
80.00%	20.00%	29.72%	31.15%
90.00%	10.00%	31.13%	34.28%
95.00%	5.00%	32.27%	36.65%
97.50%	2.50%	33.50%	38.49%
99.00%	1.00%	34.81%	40.71%

Fuente: Elaboración propia

La proyección de los perfiles de riesgo de los ritmos de producción 2,100tpd y 3,100tpd se muestra en la Figura 92.

Figura 92

Curvas de perfiles de riesgo para los ritmos de producción en evaluación



Fuente: Elaboración propia

El análisis de los perfiles de riesgo ha permitido extraer las conclusiones clave que identifican los principales factores de incertidumbre y orientan la selección del ritmo de producción óptimo para maximizar el valor económico del proyecto. Estas conclusiones ofrecen una evaluación precisa del comportamiento de los diferentes escenarios de producción, resaltando la relación entre el riesgo la rentabilidad de cada uno de ellos.

- Para los ritmos de producción de 2,100 tpd y 3,100 tpd, las TIRs de sus modelos determinístico son 25.1% y 25.9% respectivamente.
- El ROP: 2,100 tpd tiene una TIR esperada mayor que el ROP: 3,100 tpd (24.1% frente 23.8%).
- La rentabilidad del ROP:3,100 tpd es sensiblemente más imprecisa que la rentabilidad del ROP: 2,100 tpd. La TIR del ROP: 3,100 tpd tiene una probabilidad de 9.6% de superar el 31.1%, pero también tiene una probabilidad del 15.2% de no rebasar el 10% (tasa de descuento del proyecto).

- El ROP: 2,100 tpd es mucho menos arriesgado que el ROP:3,100 tpd, ya que existe certeza del 95.5% que la TIR del ROP:2,100 tpd supere la tasa de descuento de 10%; por el contrario, el ROP:3,100 tpd tiene una probabilidad menor al 85% de superar la tasa de descuento y además tiene una probabilidad del 6.5% de que su TIR sea negativa.

Con base a las estrategias de cut off, ritmo de producción y perfiles de riesgo evaluados para el caso C, se concluye que el ritmo de producción más adecuado para el proyecto es de 2,100 tpd. Tras una toma de decisiones detallada, la metodología Hill of Value Mejorada entrega resultados en ritmo de producción, cut off, LOM y VAN más razonables y robustos. En consecuencia, los detalles sobre las reservas del proyecto, resultantes de esta metodología, se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33

Reporte de reservas, óptimo del proyecto, caso C

Caso	Cut off (US\$/t)	ROP (tpd)	Reservas (t)	Ley media Au (g/t)	Ley media Ag (g/t)	NSR media (US\$/t)
Óptimo Caso C	140	2,100	3,666,376	3.47	3.80	219.92

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el escenario con cut off de 140 US\$/t y ritmo de producción 2,100 tpd es la alternativa más atractiva para la metodología de HoV Mejorada, la cual genera un VAN de 115.68M US\$, obteniéndose una mejoría económica de 328% (~88M US\$) con respecto al caso base (VAN: 27M US\$), volviendo más atractivo el proyecto.

4.4 Resultados de planes mineros

La preparación de los planes mineros se realiza para los siguientes casos: caso Base, el óptimo del caso B (HoV Tradicional) y el óptimo del caso C (HoV Mejorado). Este enfoque permite una comparación exhaustiva de las diferentes metodologías empleadas en el análisis.

La Tabla 34 presenta un resumen de los resultados obtenidos para los diferentes casos evaluados: el caso base, el óptimo del caso B (metodología HoV tradicional) y el óptimo del caso C metodología HoV mejorada). En ella se detallan parámetros clave como

el cut off, ritmo de producción y las reservas, lo que permite una comparación clara y precisa entre las metodologías aplicadas, facilitando la evaluación de los distintos enfoques en la planificación minera.

Tabla 34

Resultados de planificación minera para el caso base y los casos óptimos (HoV tradicional y HoV mejorado)

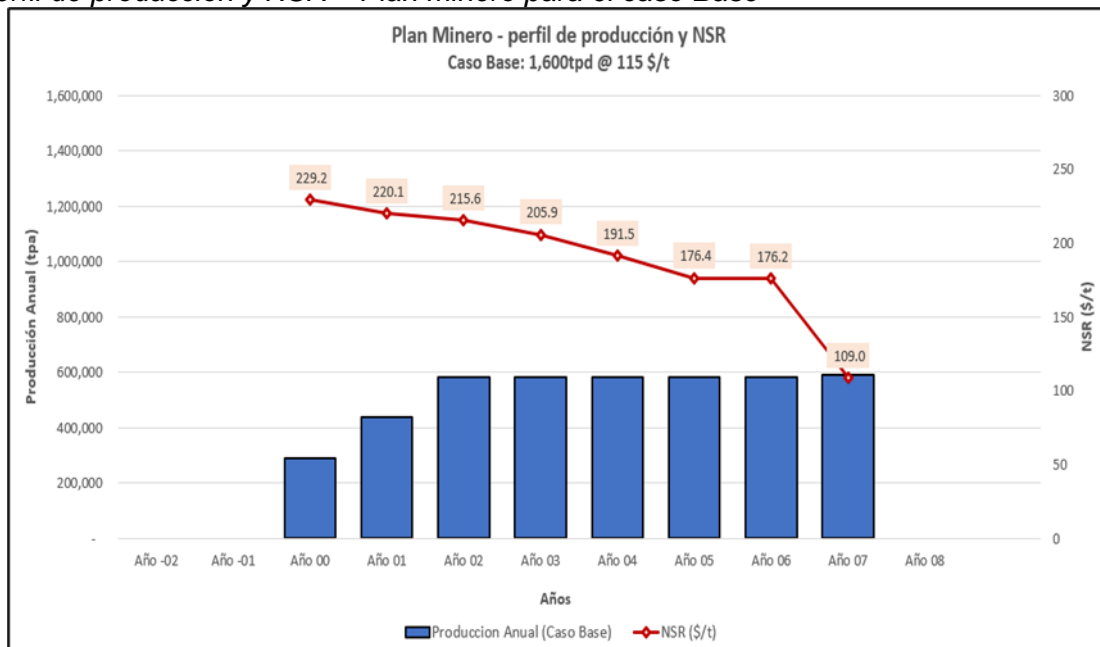
CASO	Cut off (US\$/t)	ROP (tpd)	Reservas (Mt)
Caso Base	115	1,600	4.15
Optimo Caso B	165	2,900	3.76
Optimo Caso C	140	2,100	3.66

Fuente: Elaboración propia

La secuencia de los niveles de explotación para los planes de producción se realiza privilegiando la extracción temprana de aquellas que otorgaran mayor beneficio por tonelada en los primeros años del LOM. Las Figuras 93, 94 y 95 representan los planes de producción generados en el software Deswik.CAD como su perfil de leyes a lo largo del LOM.

Figura 93

Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso Base



Fuente: Elaboración propia

Figura 94

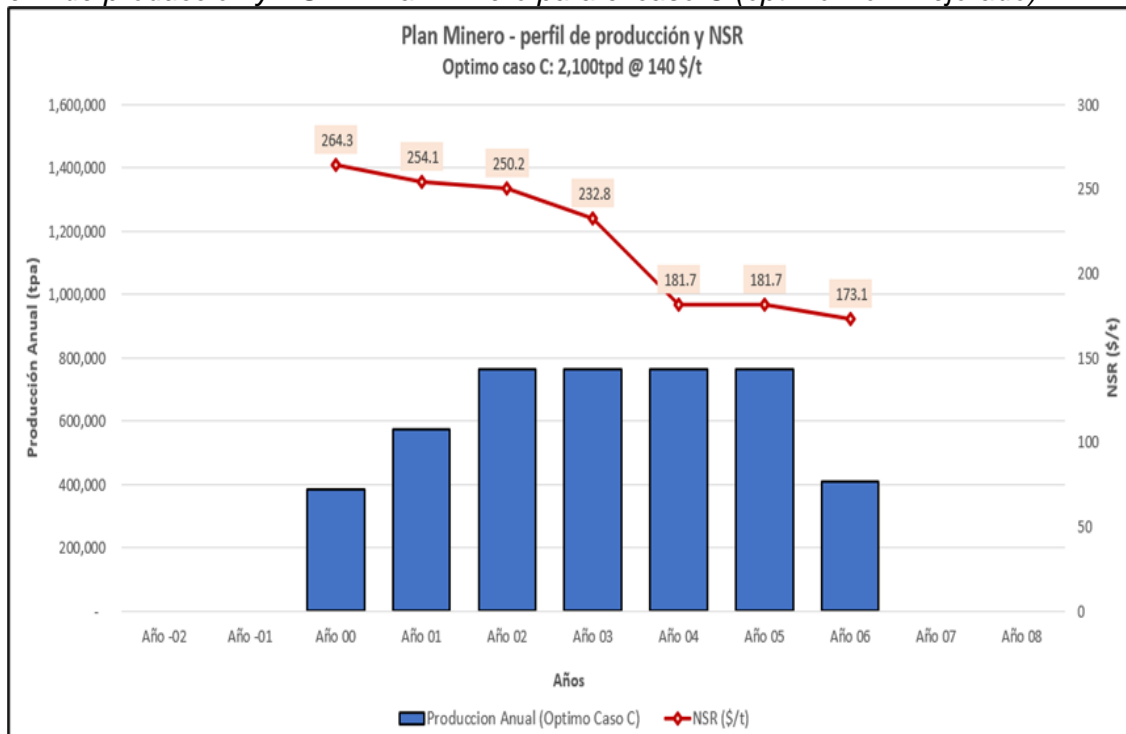
Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso B (óptimo HoV Tradicional)



Fuente: Elaboración propia

Figura 95

Perfil de producción y NSR – Plan minero para el caso C (óptimo HoV Mejorado)

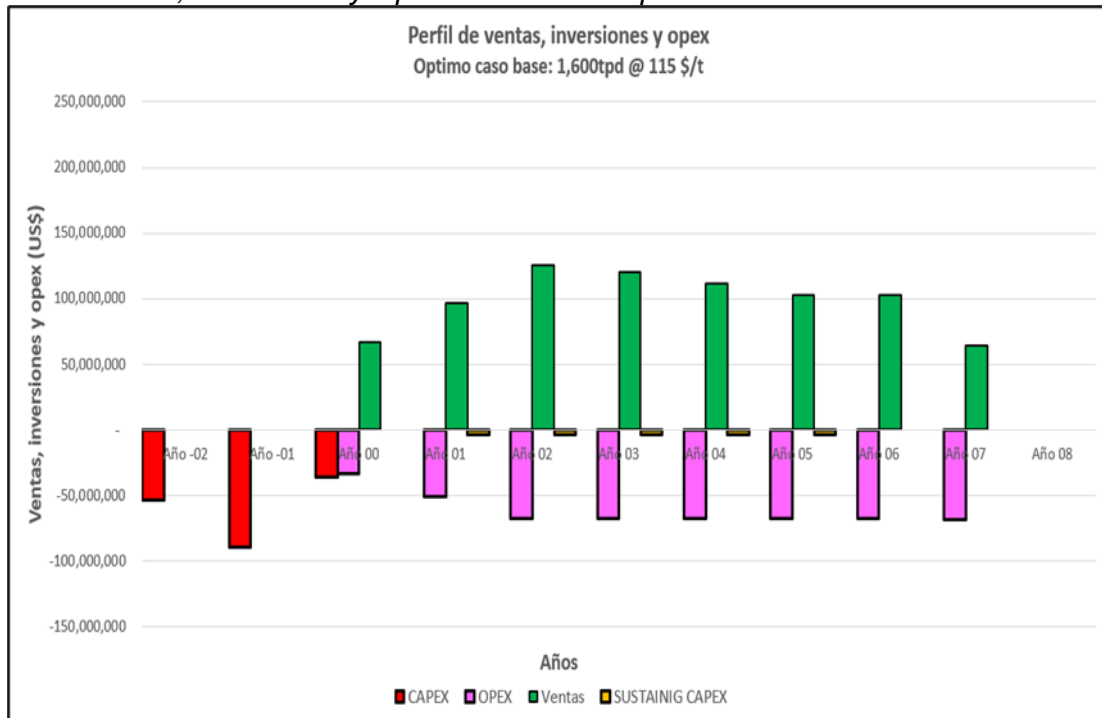


Fuente: Elaboración propia

Los ingresos por ventas, costos operativos e inversiones para cada uno de los tres casos se muestran en las Figuras 96, 97 y 98.

Figura 96

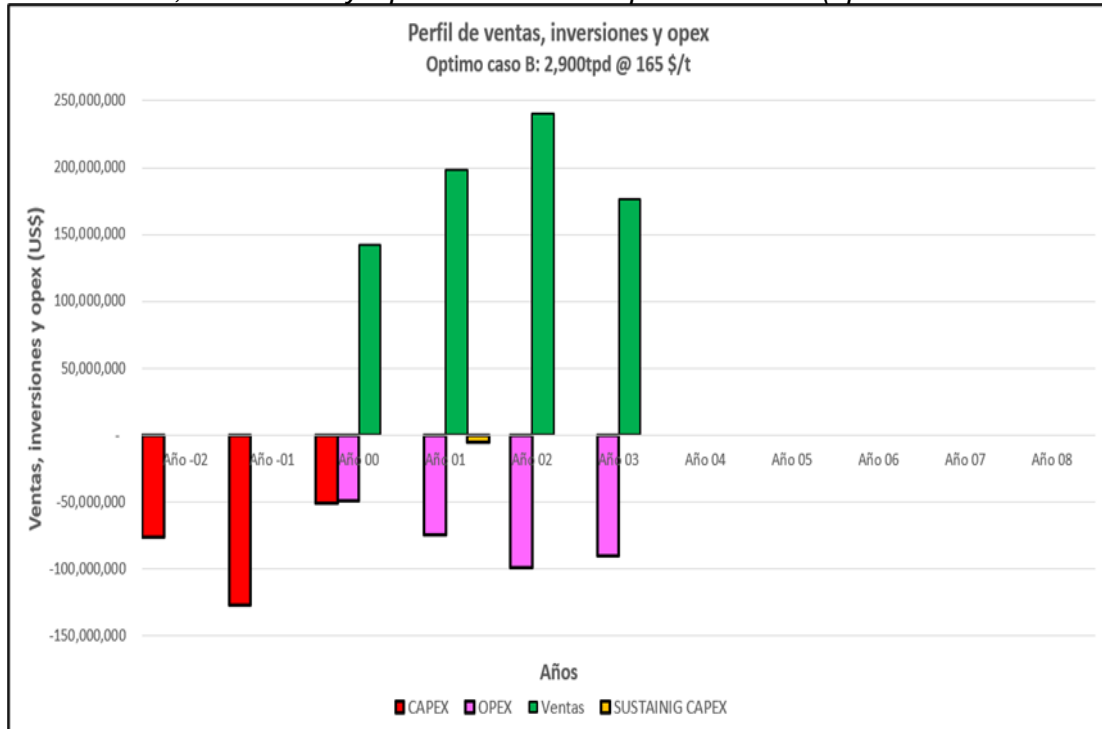
Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso Base



Fuente: Elaboración propia

Figura 97

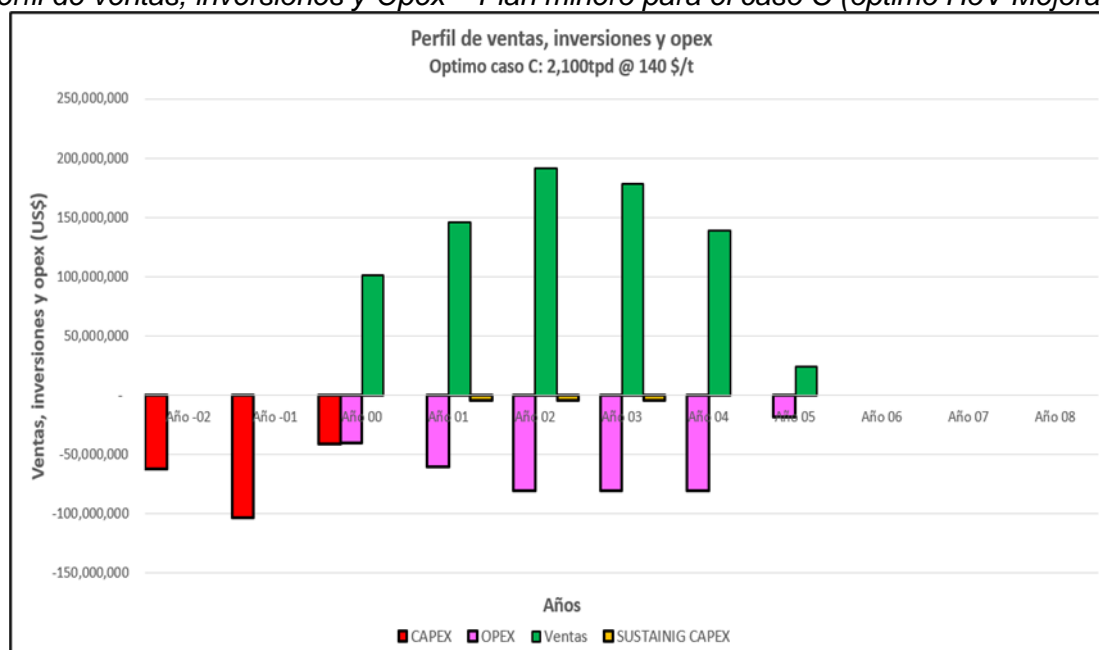
Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso B (optimo HoV Tradicional)



Fuente: Elaboración propia

Figura 98

Perfil de ventas, inversiones y Opex – Plan minero para el caso C (optimo HoV Mejorado)



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la evaluación económica de los de los planes mineros del caso Base, del optimo del Caso B y del optimo del Caso C se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35

VAN estimado en base a planes mineros

CASO	Cut off (US\$/t)	ROP (tpd)	Reservas (Mt)	VAN (M US\$)
Caso Base	115	1,600	4.15	24.47
Optimo Caso B	165	2,900	3.76	99.48
Optimo Caso C	140	2,100	3.66	105.27

Fuente: Elaboración propia

4.5 Análisis comparativo de metodologías para la selección del cut off y ritmo de producción óptimos

La metodología HoV mejorada comparte una estructura estratégica con el HoV tradicional en cuanto a la selección de variables clave, como el cut off y el ritmo de producción. Sin embargo, se diferencia por ofrecer un análisis más exhaustivo y detallado de estos parámetros. En contraste, el caso base, construido a partir del breakeven cut off, al no contar con una metodología formalmente estructurada, limita la capacidad de optimización en la toma de decisiones estratégicas. La metodología HoV mejorada destaca

por su enfoque robusto y preciso, lo que la posiciona como una alternativa superior tanto frente al HoV tradicional como al caso base.

Los parámetros estratégicos fundamentales de cada caso, tales como el cut off, ritmo de producción, reservas, VAN, etc., son presentados en la Tabla 36. Esta Tabla 36 resume y compara los resultados del Valor Actual Neto (VAN) para el caso base, las metodologías Hill of Value, Hill of Value Mejorado y el plan minero. La información permite identificar las diferencias clave entre cada enfoque y resaltar el impacto de las decisiones estratégicas sobre el VAN de cada caso con respecto al plan minero, el cual ofrece una referencia más precisa y realista para evaluar y contrastar los resultados obtenidos para los diferentes enfoques.

Tabla 36

Comparación del VAN para las metodologías HoV, HoV mejorado y plan minero

Caso	Cut off (US\$/t)	ROP (tpd)	Reservas (t)	LOM (años)	CAPEX (M US\$)	VAN HoV Tradicional (M US\$)	VAN HoV Mejorado (M US\$)	VAN Plan Minero (M US\$)
Caso Base	115	1,600	4,150,405	7.8	179.08	-45.75	27.13	24.47
Optimo Caso B	165	2,900	3,769,495	3.6	261.71	135.48	103.22	99.48
Optimo Caso C	140	2,100	3,666,376	5.5	206.37	60.24	115.68	105.27

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la Tabla 37, que ofrece una comparación de los parámetros estratégicos entre las metodologías HoV y HoV mejorado. Esta Tabla 38 ilustra las diferencias cualitativas en aspectos clave como el ritmo de producción, cut off, vida de la mina (LOM), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Índice de Valor Actual Neto (IVAN). La evaluación comparativa permite observar cómo cada metodología afecta estos parámetros y resalta las ventajas relativas de la metodología mejorada en relación con la metodología tradicional.

Tabla 37

Comparación de parámetros estratégicos entre metodologías HoV y HoV mejorado

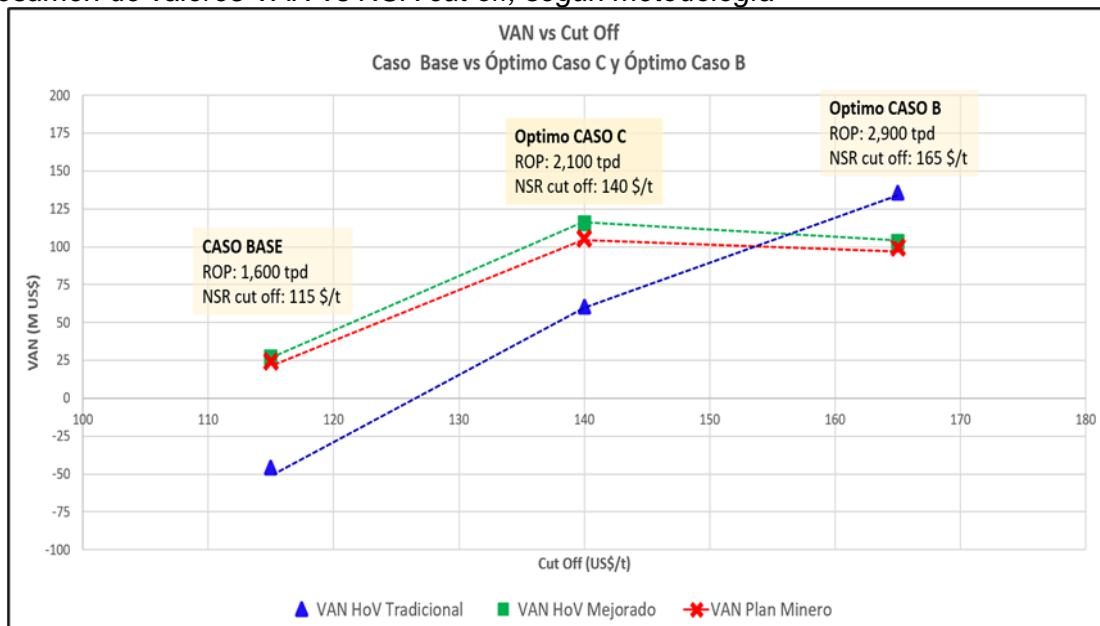
PARÁMETRO ESTRATÉGICO	HILL OF VALUE	HILL OF VALUE MEJORADO
Ritmo de Producción	Alto	Bajo
Cut off	Alto	Bajo
LOM	Bajo	Alto
VAN	Alto	Bajo
TIR	Alto	Bajo
IVAN	Bajo	Alto

Fuente: Elaboración propia

La Figura 99 muestra los resultados de VAN del caso Base, del óptimo del Caso B y del óptimo del Caso C, generados para sus respectivas metodologías y sus planes mineros. Al utilizar los valores de VAN de los planes mineros como referencia en la Figura 99, se facilita una evaluación estratégica que permite comparar de manera más clara las metodologías y determinar cuál es la más adecuada para la toma de decisiones.

Figura 99

Resumen de valores VAN vs NSR cut off, según metodología



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, podemos concluir lo siguiente:

El escenario correspondiente al Caso Base, el cual trabajaría con la metodología del Breakeven cut off, es considerablemente menos atractiva que las obtenidas con leyes de corte mayores.

El VAN HoV Tradicional ratifica que sobreestima el VAN del proyecto (al compararlo con el VAN del plan minero), debido a que esta metodología contempla que el escenario evaluado inicie con un ritmo de producción máximo; sesgo que puede traer como consecuencia una selección errónea del NSR cut off y un ritmo de producción mayor al óptimo.

El VAN del HoV Mejorado estima bastante bien el VAN del proyecto entendiendo que las estrategias planteadas hacen más confiable por definición la evaluación del proyecto, esto cuando se comparan los valores de VAN similares que existen entre el estimado por la metodología mejorada y el VAN del plan minero para cada NSR cut off evaluado.

Por lo tanto, el escenario de la metodología HoV Mejorada con valores de cut off de 140 US\$/t y ritmo de producción 2,100 tpd es la alternativa más robusta y ajustada para el proyecto, por sobre los valores de cut off de 165 US\$/t y ritmo de producción 2,900 tpd de la metodología HoV y sobre el caso base que trabaja el proyecto en base a la metodología del Breakeven cut off (de cut off de 115 US\$/t y ritmo de producción 1,600 tpd).

Esta decisión genera que el VAN aumente en un 328% por sobre el caso Base (+88M US\$), las reservas extraíbles disminuyen en torno a un 11.7%, el incremental del perfil de inversiones es del 15%, lo cual no es una gran variación con respecto al monto total a invertir para el caso Base, y la rentabilidad (25.10%) se duplique con respecto al caso Base (13.01%).

4.6 Contrastación de hipótesis

4.6.1 Formulación de hipótesis nula

En esta investigación se evalúa si la optimización del Valor Actual Neto (VAN) mediante la determinación conjunta de un cut off y un ritmo de producción óptimos, considerando la variabilidad dinámica de los parámetros a lo largo del tiempo bajo la metodología Hill of Value mejorada, permite una evaluación económica más precisa y

alineada a la ejecución de un plan minero detallado que la obtenida mediante la metodología Hill of Value tradicional.

Con el objetivo de contrastar si la metodología Hill of Value mejorada proporciona estimaciones de Valor Actual Neto (VAN) más cercanas al valor obtenido mediante el plan minero detallado, se definen las siguientes variables:

$VAN_{plan,i}$: VAN obtenido del plan minero detallado para el caso i

$VAN_{trad,i}$: VAN estimado por la metodología HoV tradicional para el caso i

$VAN_{mej,i}$: VAN estimado por la metodología HoV mejorada para el caso i

Calculamos los errores absolutos de cada metodología respecto al plan:

$$E_{trad,i} = |VAN_{trad,i} - VAN_{plan,i}|$$

$$E_{mej,i} = |VAN_{mej,i} - VAN_{plan,i}|$$

A partir de esas definiciones, se formulará la hipótesis nula correspondiente para su validación estadística.

4.6.1.1 Hipótesis nula (H_0). La optimización del VAN del proyecto minero subterráneo de oro mediante la metodología HoV mejorada no presenta diferencias significativa respecto a los enfoques tradicionales en cuanto a precisión y alineamiento con el plan minero.

$$H_0 = \mu_{E_{mej}} = \mu_{E_{trad}}$$

4.6.1.2 Hipótesis Alternativa (H_1). La metodología HoV mejorada sí presenta una mayor precisión y un mejor alineamiento con el plan minero en comparación con la metodología HoV tradicional.

$$H_1 = \mu_{E_{mej}} < \mu_{E_{trad}}$$

Donde $\mu_{E_{mej}}$ es la media de los errores $E_{E_{mej},i}$ y $\mu_{E_{trad}}$ es la media de los errores $E_{trad,i}$

4.6.2 Aplicación de la prueba t de student para muestras relacionadas

Se evaluó un conjunto de 20 escenarios, en los cuales se calculó el error absoluto de las metodologías HoV tradicional y mejorada respecto al VAN obtenido del plan minero a detalle. La información se resume en la Tabla 38.

Tabla 38

Resumen de errores absolutos HoV tradicional y HoV mejorado

Escenario	VAN Plan Minero	VAN HoV Tradicional	Error Absoluto HoV Tradicional E_{trad}	VAN HoV Mejorada	Error Absoluto HoV Mejorada E_{mej}
01	24.4	-45.7	77.9	27.1	0.1
02	99.5	135.5	68.3	103.2	9.9
03	105.3	60.2	23.4	115.7	10.7
04	-195.7	-343.8	148.0	-173.2	22.5
05	-194.9	-341.9	146.9	-172.5	22.4
06	-157.7	-300.1	142.3	-139.6	18.1
07	-160.5	-300.2	139.6	-142.1	18.4
08	57.9	47.7	10.2	51.3	6.6
09	46.1	31.8	14.3	40.8	5.3
10	30.8	16.6	14.2	27.3	3.5
11	108.7	126.9	18.1	96.2	12.5
12	109.3	128.3	18.9	96.8	12.5
13	110.1	129.6	19.4	97.5	12.6
14	105.6	45.3	60.3	93.5	12.1
15	104.8	44.6	60.2	92.8	12.0

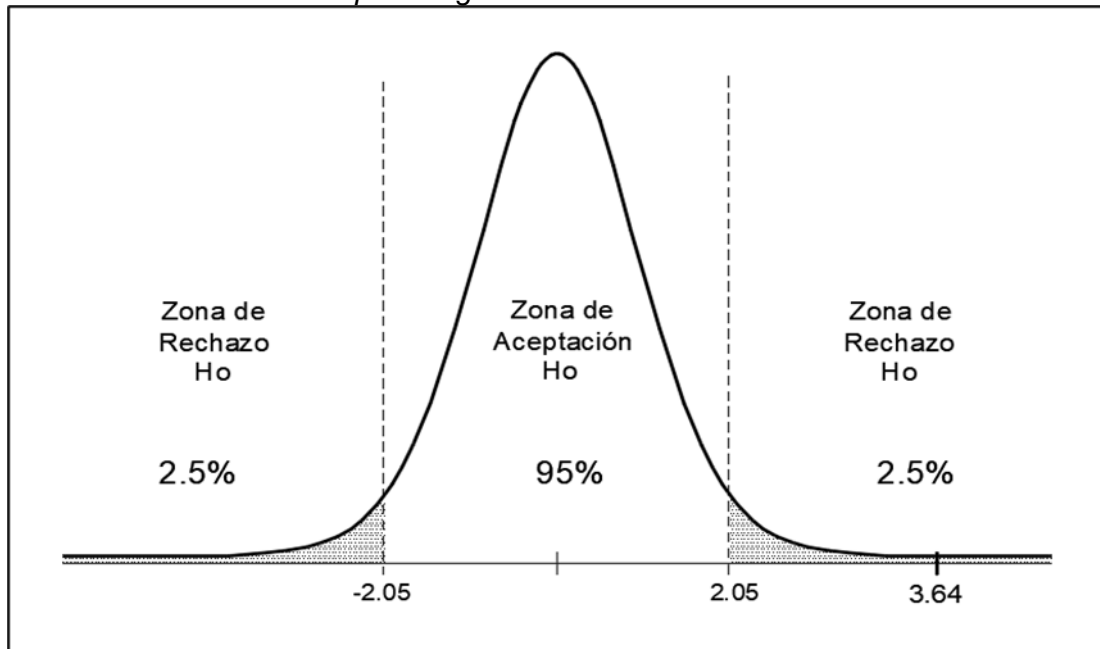
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos, se aplicó una prueba t de Student para muestras relacionadas con los siguientes resultados:

- Estadístico t ≈ 3.64
- Valor P ($T \leq t$) = 0.000544
- Valor crítico t ($\alpha=0.05, gl=28$) ≈ 2.05

Figura 100

Distribución t de Student – Hipótesis general



Fuente: Elaboración propia

4.6.3 Decisión estadística sobre la Hipótesis

Dado que el estadístico t calculado excede el valor crítico y el valor p es considerablemente menor que el nivel de significancia convencional ($\alpha=0.05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0). Esto significa que existe evidencia estadísticamente significativa para afirmar que la metodología HoV mejorada proporciona estimaciones del VAN más cercanas al plan minero detallado, en comparación con la metodología HoV tradicional.

En consecuencia, se concluye que las mejoras aplicadas en la metodología HoV introducen un incremento significativo en la precisión y ajuste en la optimización del proyecto minero subterráneo de Au.

Conclusiones

Esta tesis presenta un enfoque integral para la planificación y optimización de una mina subterránea, resaltando la utilidad de la metodología Hill of Value en la toma de decisiones estratégicas. La selección de un método de explotación adecuado, combinada con la optimización precisa de los parámetros económicos y operativos, permite maximizar el valor económico del proyecto y asegurar su viabilidad a largo plazo.

El estudio presentado se centra en una mina subterránea destinada a la extracción de oro, empleando el método de explotación de Tajeo por Taladros Largos en su variante longitudinal, conocido como Bench and Fill (B&F). Este método seleccionado (en la etapa de prefactibilidad del proyecto) por su adecuación a las características geomecánicas y geométricas del yacimiento mineralizado, permite una explotación eficiente y segura de las vetas con alturas de banco de 16 metros.

El Valor Actual Neto se establece como parámetro fundamental en las metodologías de optimización aplicadas en la presentadas en la tesis, al ser una herramienta robusta para evaluar la viabilidad económica del proyecto minero. Su capacidad para incorporar ingresos y costos anuales permite una valorización dinámica y adaptable frente a condiciones económicas variables.

La metodología Hill of Value (HoV) ha sido fundamental para la optimización del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, enfocándose en la determinación óptima de dos variables independientes tales como el cut off y el ritmo de producción. A través de un análisis sistemático, se ha demostrado que una correcta selección de estos parámetros es crucial para maximizar la rentabilidad del proyecto. Las curvas o superficie de respuestas 3D del VAN en función del cut off y el ritmo de producción generadas por la metodología ofrecen una herramienta visual clara para identificar los puntos óptimos, facilitando la toma de decisiones informadas y enfocadas en maximizar el valor económico.

La metodología Hill of Value (HoV) resalta que un incremento en las reservas por la utilización de un cut off bajo no garantiza un mayor valor económico, destacando la

necesidad de priorizar la inclusión de material que pueda incrementar el valor económico y excluyendo aquellos que lo reduzcan. De acuerdo con los resultados presentados, el óptimo VAN para un proyecto de mina subterránea se alcanzará cuando el proyecto adopte valores de cut off's superiores al cut off económico, lo que subraya la necesidad de un enfoque estratégico en la selección del cut off para maximizar el valor del proyecto.

La metodología Hill of Value (HoV) revela que la búsqueda de un aumento en el ritmo de producción podría resultar en un decremento del VAN si las capacidades del sistema de producción se ven sobrepasadas. Las inversiones de capital necesarias para expandir la capacidad deben ser justificadas por un incremento tangible en la rentabilidad, evitando decisiones que puedan comprometer la viabilidad económica del proyecto. Esto subraya la importancia de un análisis cuidadoso para equilibrar la producción y las inversiones, asegurando una optimización sostenible y rentable del proyecto minero.

En línea con lo anterior, la estrategia de priorizar la extracción temprana de materiales con mayor beneficio por tonelada durante los primeros años de la vida de la mina (LOM) es clave para maximizar la rentabilidad del proyecto. Esta planificación, enfocada en los perfiles de producción garantiza un flujo de caja robusto en las etapas iniciales y mejora el desempeño económico del proyecto.

La calidad del levantamiento de información es fundamental para el éxito de la metodología HoV, ya que asegura que las decisiones metodológicas estén basadas en un entendimiento profundo de las condiciones específicas del proyecto minero, facilitando un enfoque integral y riguroso.

La presente tesis toma como punto de referencia un Caso Base, definido por los resultados del estudio de prefactibilidad, el cual considera un ritmo de producción fijo y aplica el enfoque de breakeven cut off para la selección del cut off. Este Caso Base se compara con la metodología HoV tradicional (Caso B), que permite una evaluación más dinámica y precisa en la selección de las variables cut off y ritmo de producción, aunque presenta limitaciones al asumir capacidad de producción constante, leyes fijas y una distribución uniforme de inversiones. Asimismo, se compara con la metodología HoV

mejorada (Caso C), que supera dichas limitaciones, permitiendo una optimización más realista y precisa del valor económico del proyecto.

El caso Base definió un cut off de 115 US\$/t y un ritmo de producción de 1,600 tpd, generando como resultado un VAN subóptimo de 24.47M US\$ y una TIR de 13.01%. Estos resultados constituyen la referencia para comparar los escenarios optimizados mediante las metodologías HoV Tradicional y HoV Mejorada, con el objetivo de evaluar mejoras en la rentabilidad del proyecto.

La metodología breakeven cut off genera resultados de VAN subóptimos en comparación con los obtenidos mediante las metodologías Hill of Value Tradicional y Hill of Value Mejorada, incluso al considerar variables inestables como el precio y el costo de producción. La adopción de la metodología HoV introduce un enfoque más dinámico y optimizado para la selección de reservas, superando la rigidez del enfoque estático del Breakeven cut off, lo que contribuye a una mejor valoración y planificación de proyectos mineros.

La aplicación de la metodología Hill of Value Tradicional y Mejorada se fundamentó en la identificación de las combinaciones óptimas entre 29 valores de cut off, que varían desde 60 US\$/t, 65 US\$/t, ... hasta 200 US\$/t, y 27 ritmos de producción, que oscilan entre 1,000 tpd, 1,100 tpd, ... hasta 3,600 tpd. Estas combinaciones permitieron evaluar una amplia gama de escenarios, optimizando los parámetros clave del proyecto para mejorar la rentabilidad en comparación con el caso Base.

El Caso B se fundamenta en la metodología HoV Tradicional, que ha sido clave para la optimización del VAN del proyecto. Este enfoque se centra en la determinación óptima de dos variables independientes: el cut off y el ritmo de producción. A través de un análisis sistemático soportado por las superficies de respuesta 3D del VAN, se ha evidenciado que la correcta selección de estos parámetros es esencial para maximizar la rentabilidad del proyecto.

En el caso B, la aplicación de diferentes valores de cut off permitió identificar reservas que varían significativamente en tamaño, desde 6.58M de toneladas con un cut

off de 60 US\$/t hasta 3.26M de toneladas con un cut off de 200 US\$/t, evidenciando cómo el criterio de cut off impacta en la estimación de reservas y en la viabilidad económica del proyecto.

El análisis de resultados del caso B permitió identificar un valor óptimo de cut off de 165 US\$/t, acompañado de un ritmo de producción óptimo de 2,900 tpd. Estos parámetros dan como resultado un VAN de 135.48M US\$ y una TIR de 36.4%; representando una mejora significativa del 450% en comparación con el caso base, destacando la efectividad del enfoque para maximizar la rentabilidad del proyecto minero.

La metodología Hill of Value (HoV) Tradicional si bien permite identificar un cut off y ritmo de producción que parecen óptimos y mejorar la rentabilidad del proyecto minero, tiende a sobreestimar el Valor Actual Neto. Esta sobreestimación proviene de la adopción de supuestos irreales, como una capacidad de producción constante desde el inicio del proyecto, una ley media invariable a lo largo de la vida útil de la mina, y una recuperación minera del 100 %; sesgos que puede traer como consecuencia una selección errónea tanto del cut off como del ritmo de producción, que, aunque sea superior, no necesariamente representa la verdadera optimización del proyecto.

La metodología HoV Mejorada (Caso C) toma como base el enfoque del HoV Tradicional y supera sus limitaciones al integrar aspectos claves como la capacidad de producción variable, ley media y perfiles de inversión ajustados a lo largo del LOM, detalle en la limpieza de reservas, recuperación minera inferior al 100%. Además, incorpora el riesgo mediante un modelo económico estocástico, ofreciendo así una evaluación más precisa y realista del valor económico del proyecto.

En el Caso C, la aplicación de diferentes valores de cut off permitió identificar reservas que varían significativamente en tamaño, desde 5.71 M de toneladas con un cut off de 60 US\$/t hasta 2.82M de toneladas con un cut off de 200 US\$/t. Esto evidencia nuevamente cómo el criterio de cut off influye de manera determinante en la estimación de reservas y viabilidad económica del proyecto.

El análisis de resultados del Caso C identifico un valor óptimo de cut off de 140 US\$/t y dos ritmos de producción óptimos, 2,100 tpd y 3,100 tpd, resultado del proceso de descongestionamiento del cuello de botella (debottlenecking) asociado a los recursos disponibles. La dualidad en los ritmos de producción se explica por la necesidad de una inversión significativa para alcanzar el segundo pico productivo de 3,100 tpd. Este incremento plantea un desafío económico, ya que requiere evaluar cuidadosamente los costos de capital frente a los beneficios potenciales, con el objetivo de maximizar la rentabilidad del proyecto sin comprometer los recursos disponibles.

El ritmo de producción de 2,100 tpd se presenta como la opción óptima para maximizar el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto para el Caso C, ya que ofrece un rendimiento financiero similar al de 3,100 tpd, pero con una inversión inicial significativamente menor y mayor estabilidad operativa. Aunque el ROP de 3,100 tpd genera un VAN ligeramente superior (120.10M US\$ en comparación con los 115.68M US\$ del ROP de 2,100 tpd), el incremento marginal del +4.5% en el VAN no justifica la inversión adicional de 46.8M US\$ requerida para optar por un ritmo de producción mayor. Asimismo, el ROP de 2,100 tpd permite un LOM mayor (5.5 años frente a 3 años), lo que contribuye a la estabilidad y sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

El análisis basado en el modelo económico estocástico, basado en la simulación Montecarlo y en el estudio de perfiles de riesgo para el Caso C, resalta que el ritmo de producción de 2,100 tpd es la opción más rentable y menos arriesgada para maximizar el valor económico del proyecto. Aunque el ROP de 3,100 tpd presenta una TIR determinística ligeramente superior (25.9% frente a 25.1% del OP de 2,100 tpd), su mayor incertidumbre lo convierte en una alternativa menos favorable. El ROP de 2,100 tpd muestra una TIR esperada mayor (24.1% frente a 23.8%) y ofrece una probabilidad del 95.5% de superar la tasa de descuento del 10%, en contraste con el ROP de 3,100 tpd, que presenta una probabilidad menor al 85% de no alcanzar esta tasa de descuento y un riesgo del 6.5% de obtener una TIR negativa. La integración de la incertidumbre en las

variables económicas a través de la simulación Montecarlo ha sido clave para esta evaluación, mejorando la precisión en la toma de decisiones sobre el ritmo de producción.

A partir de las conclusiones anteriores, la metodología Hill of Value (HoV) Mejorada aplicada al Caso C seleccionó un ritmo de producción óptimo de 2,100 tpd y un cut off de 140 US\$/t, logrando un VAN de 115.68M US\$ y una TIR de 25.10%, lo que representa una mejora del 370% en comparación con el Caso Base. Este enfoque no solo ajusta mejor al plan minero, sino que también maximiza la rentabilidad del proyecto.

El caso óptimo de la metodología HoV Mejorada con valores de cut off de 140 US\$/t y ritmo de producción 2,100 tpd, se presenta como la alternativa más sólida, optimizando eficientemente el proyecto. Este caso supera al Caso Base, que se fundamenta en el enfoque del breakeven cut off (con un cut off de 115 US\$/t y ritmo de producción 1,600 tpd), y se ajusta de manera mucho más precisa que el caso óptimo de la metodología HoV Tradicional, que propone un cut off de 165 US\$/t y ritmo de producción 2,900 tpd. La robustez de este caso queda en evidencia con los resultados del plan minero, que reportan un VAN de 105.27M US\$, notablemente superior a los 24.47M US\$ del caso Base.

Aunque la decisión de tomar como opción final el óptimo de la metodología HoV Mejorada, resulta en una disminución del 12% en las reservas minerales y un aumento del 15% en el perfil de inversiones (incremento no significativo en comparación al monto total de inversión del caso Base); esta decisión genera un incremento del VAN del 330% respecto al caso Base (+80M US\$). Asimismo, la rentabilidad se duplica, alcanzando una TIR del 25.10% frente al 13.01% del caso Base.

La elaboración de planes mineros correspondientes a los escenarios óptimos del Caso B (HoV Tradicional) y Caso C (HoV Mejorada) no solo facilita una evaluación y comparación integral de las diferentes metodologías en términos de optimización y toma de decisiones estratégicas, sino que también valida como se ajusta cada metodología a un plan minero y a las condiciones operativas reales del proyecto.

La contrastación de hipótesis concluyó que la metodología Hill of Value mejorada optimiza el proyecto y proporciona estimaciones del VAN más precisas y ajustadas

respecto a un plan minero detallado, en comparación con la metodología tradicional. Esto valida que las mejoras introducidas en la metodología Hill of Value permiten una optimización más realista y ajustada del proyecto minero subterráneo de oro.

La comparación de los planes mineros realizados para el Caso Base, el óptimo del Caso B (HoV Tradicional) y el óptimo del Caso C (HoV Mejorada), revela que este último no solo optimiza el cut off y el ritmo de producción, sino que también permite estimar el VAN con una desviación aproximada del 10 % respecto a un plan minero detallado. Esta diferencia se justifica por la incorporación de supuestos más realistas, tales como la variabilidad en la capacidad de producción, la ley media, el perfil de inversiones en el tiempo, la limpieza de reservas y una recuperación minera inferior al 100 %, proporcionando así el HoV Mejorado una representación más precisa de las condiciones operativas del proyecto minero subterráneo.

La implementación de la metodología Hill of Value (HoV) Mejorada permite una planificación minera más ágil y eficiente, reduciendo los tiempos requeridos hasta en un 80% en comparación con los enfoques tradicionales. Esta metodología es flexible y aplicable a diversos proyectos de minería subterránea, adaptándose a las condiciones específicas de cada caso, tales como la fase de ingeniería, las variables operativas críticas y las herramientas analíticas empleadas. Esto facilita la estimación precisa del ritmo óptimo de producción y de las inversiones necesarias, permitiendo una toma de decisiones más informada y maximizando el valor del proyecto.

Recomendaciones

Esta metodología puede aplicarse a otros proyectos de minas subterráneas, siempre que se ajusten a las condiciones específicas de cada proyecto. Esto incluye determinar el tipo de fase de ingeniería que se debe alcanzar, identificar las variables operativas críticas que influyen significativamente en el VAN del proyecto, definir las herramientas y técnicas apropiadas para analizar cada variable, así como establecer el número de escenarios necesarios a evaluar. Con este enfoque, se podrá estimar de manera precisa el cut off, el ritmo óptimo de producción, las inversiones requeridas y mejorar la toma de decisiones para maximizar el valor del proyecto.

Para las primeras etapas de estudio de un proyecto subterráneo, se recomienda aplicar con precaución las fórmulas empíricas de Taylor ya que omiten ciertos factores clave. Esta fórmula debe considerarse únicamente como un punto de partida para complementar con teorías económicas más complejas, ajustadas a las particularidades de cada proyecto.

Aunque se utilizan diferentes precios para la generación de escenarios y finalmente determinar los valores óptimos de las variables independientes: cut off y ritmo de producción, la evaluación económica final se basa en un único precio. Un enfoque más robusto incluiría un análisis de precios a través de contratos de futuros, lo que permitiría reducir la incertidumbre en las proyecciones económicas del proyecto al incorporar escenarios más realistas sobre las fluctuaciones del mercado.

Actualmente, los costos de operación en mina y planta se consideran constantes en el tiempo, lo cual simplifica el análisis y puede afectar los resultados. En la práctica, los costos suelen seguir un perfil de "curva de bañera", con valores más elevados en las fases inicial y final del proyecto, mientras que se estabilizan en la fase intermedia. Un análisis futuro que integre esta variabilidad temporal permitiría reflejar con mayor precisión los costos asociados al ciclo de vida del proyecto.

Se recomienda continuar el proceso de investigación sobre la metodología propuesta, con el objetivo de fomentar la mejora continua y optimizar su aplicación en proyectos mineros subterráneos.

Referencias bibliográficas

- De la Huerta F. (1994). *Aplicación del criterio de costo de oportunidad en la planificación de producción de minas subterráneas*. Máster Thesis Universidad de Chile.
- Hall B.E. (2017). *Cut off grade optimizing the strategic mine*. AUSIMM Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Hall B.E. (2003). *How mining companies improve share price by destroying shareholder value*. Proceedings CIM Mining Conference and Exhibition, Montreal, Canada.
- Hall B.E. (2015). *The role of Mine Planning in High performance*. AUSIMM Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Lane K.F. (1988). *The economic definition of ore, cutoff grade in theory and practice*. Mining Journal books, London Mining, Metallurgy & Exploration. Mining Journal books.
- Ovalle A. y Vera M. (2014). *Optimizing Hill of Value for block caving*. 3er international symposium on block and sub level, Santiago, Chile.
- OZ Minerals 2017, *OZ Minerals Carrapateena Feasibility Study Update*. https://www.ozminerals.com/uploads/media/170824_ASX_Release_Carrapateena_Feasibility_Study_Update.pdf, accessed 31 July 2023.
- Rendu J.M. (2014). *An introduction to cut off grade estimation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Taylor H.K. (1986). *Rates of working of mines a simple rule of thumb*. Institution of Mining and Metallurgy Transactions Section A Mining Industry, 95.
- Vasquez J (2017). *Optimization of mining planning in block / panel caving mines including development activities*. APCOM, Golden.
- Zafra J. y Vila J. (2019). *Optimización de beneficios con gestión de riesgos en las minas subterráneas*. Máster Thesis. Universidad Católica del Perú.