

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis de sensibilidad entre el throughput de planta, CAPEX y
reservas para la maximización del NPV en operaciones mineras**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Edson Lenon Avalos Saravia

 [0009-0006-8336-0547](https://orcid.org/0009-0006-8336-0547)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Avalos Saravia [1]
Referencia/Reference	[1] E. Avalos Saravia, “Análisis de sensibilidad entre el throughput de planta, CAPEX y reservas para la maximización del NPV en operaciones mineras” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Avalos, 2025)
Referencia/Reference	Avalos, E. (2025). <i>Análisis de sensibilidad entre el throughput de planta, CAPEX y reservas para la maximización del NPV en operaciones mineras</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a todas las personas que han hecho posible mi desarrollo académico y profesional.

A mis padres, quienes han sido pilares fundamentales y responsables directos de mi formación universitaria. Su esfuerzo y sacrificio han sentado las bases de mi carrera.

A mi esposa y a mi hijo, por su amor, paciencia y apoyo incondicional en toda circunstancia, alentándome permanentemente a seguir creciendo profesionalmente.

Finalmente, a mis hermanos, quienes, al verme como ejemplo, me han motivado constantemente a ser siempre el mejor.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la empresa Hudbay por la confianza depositada y por brindarme la valiosa oportunidad de seguir creciendo profesionalmente.

Extiendo mi gratitud a cada uno de los colaboradores y líderes de Hudbay, de quienes he adquirido conocimientos esenciales. Estas experiencias han sido cruciales para afianzar y enriquecer mi perfil profesional, preparándome para mayores desafíos.

Resumen

La presente investigación tuvo como finalidad evaluar la viabilidad económica de expandir la capacidad de planta de una operación minera mediante la integración de un proyecto satélite de cobre y el análisis conjunto de throughput, reservas y precio del metal. El objetivo central consistió en identificar si el incremento del procesamiento desde 34 Mt/año hasta 46 Mt/año genera un mayor valor presente neto (NPV) frente al caso base, considerando distintos niveles de inventario mineral y variaciones del CAPEX asociado a la expansión.

Se analizaron 24 escenarios que combinan cuatro capacidades de planta y seis niveles de reservas del yacimiento satélite. Los resultados mostraron que la expansión solo genera valor adicional cuando el inventario de reservas alcanza al menos 322 Mt, umbral que permite compensar el CAPEX base de 500 MUSD. Reservas inferiores no justifican la ampliación, mientras que inventarios superiores incrementan de manera significativa el valor económico del proyecto.

La sensibilidad al CAPEX evidenció que aumentos hacia 550–650 MUSD reducen de manera importante el NPV incremental, desplazando el punto de equilibrio hacia mayores volúmenes de reservas. Asimismo, el análisis del precio del cobre indicó que la conveniencia de la expansión depende directamente del mercado: para precios menores o iguales a 3.75 US\$/lb, el caso base es más atractivo; sin embargo, para valores por encima de 4.50 US\$/lb la alternativa expandida se vuelve claramente superior.

Finalmente, la prueba T pareada aplicada a los 42 escenarios evaluados demostró que el NPV del caso T46 es significativamente mayor que el del caso T34 ($p = 0.017$), respaldando estadísticamente las conclusiones del análisis económico.

En conjunto, la investigación evidencia que la expansión de planta es viable únicamente bajo condiciones adecuadas de reservas, costos y precios del cobre, siendo necesario un enfoque integrado de análisis para la toma de decisiones estratégicas.

Palabras clave — Valor presente neto, throughput, reservas mineras, CAPEX, sensibilidad económica, Hill of Value.

Abstract

This research aimed to evaluate the economic feasibility of expanding the processing capacity of a mining operation by integrating a satellite copper deposit and analyzing the combined effects of throughput, mineral reserves, and copper price variability. The main objective was to determine whether increasing plant capacity from 34 Mt/year to 46 Mt/year generates higher Net Present Value (NPV) compared to the base case, under different levels of satellite reserves and varying expansion CAPEX assumptions.

A total of 24 scenarios were evaluated, combining four processing capacities and six reserve levels. The results show that the expansion only generates additional value when the satellite deposit reaches at least 322 Mt of reserves, which offsets the base expansion CAPEX of 500 MUSD. Smaller inventories do not justify the investment, while larger reserves allow for a substantial increase in project value.

The CAPEX sensitivity revealed that increases toward 550–650 MUSD significantly reduce the incremental NPV and shift the economic threshold toward higher reserve volumes. Likewise, the copper price analysis showed that the attractiveness of the expansion is strongly dependent on market conditions. For prices equal to or below 3.75 US\$/lb, the base case remains economically superior; however, for prices above 4.50 US\$/lb, the expanded scenario becomes consistently more profitable.

A paired t-test applied to the 42 evaluated scenarios confirmed that, on average, the NPV of the 46 Mt/year case is significantly higher than that of the 34 Mt/year case ($p = 0.017$), statistically supporting the deterministic results.

Overall, the study demonstrates that plant expansion is economically feasible only under favorable reserve levels, investment costs, and copper prices, reinforcing the need for an integrated analytical framework for strategic decision-making.

Keywords — Net present value, throughput, mineral reserves, CAPEX, economic sensitivity, Hill of Value.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xv
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 Objetivo.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis	4
1.4.1 Hipótesis general	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	5
1.5 Operacionalización de variables.....	5
1.5.1 Variable independiente (V.I).....	5
1.5.2 Variable dependiente (V.D)	5
1.6 Antecedentes referenciales	8
1.6.1 Antecedentes internacionales	8
1.6.2 Antecedentes nacionales	8
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	9
2.1 Marco teórico	9
2.1.1 Evaluación económica de proyectos mineros.....	9
2.1.2 Valor Presente Neto (NPV) aplicado a minería.....	9
2.1.3 Variables críticas en la evaluación minera.....	10
2.1.4 Análisis de sensibilidad y optimización	14

2.1.5	El enfoque Hill of Value (HOV)	14
2.2	Marco conceptual.....	17
2.2.1	NPV	17
2.2.2	Throughput.....	17
2.2.3	Reservas.....	17
2.2.4	CAPEX.....	18
2.2.5	OPEX.....	18
2.2.6	Sensibilidad.....	18
2.2.7	LOM (Life of Mine)	18
2.2.8	Escenarios	18
2.2.9	Producción	18
2.2.10	Expansión	18
2.2.11	Rentabilidad	19
2.2.12	Optimización	19
2.2.13	Incertidumbre	19
	Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	20
3.1	Recolección de datos.....	20
3.1.1	Unidad de estudio	20
3.1.2	Datos recolectados	20
3.2	Procesamiento de la información	24
3.2.1	Definición de escenarios	25
3.2.2	Perfiles de producción anual por escenario (mina principal + satélite).....	28
3.2.3	Construcción del modelo financiero corporativo	30
3.2.4	Primera etapa: Análisis de reservas con CAPEX fijo (500 MUSD)	31
3.2.5	Segunda etapa: Sensibilización del CAPEX (350–650 MUSD)	36
3.2.6	Tercera etapa: Sensibilización del precio del cobre.....	40
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	41
4.1	Comparación económica entre casos base y escenarios de expansión	41

4.1.1	Resultados económicos iniciales (CAPEX = 500 MUSD)	41
4.2	Análisis de sensibilidad del NPV respecto al CAPEX	42
4.2.1	Evaluación cuantitativa del NPV para diferentes niveles de CAPEX	42
4.2.2	Análisis descriptivo del comportamiento económico.....	43
4.3	Sensibilidad del precio del cobre.....	43
4.3.1	Sensibilidad combinada del NPV en función del precio del cobre y el throughput (Reserva fija = 322 Mt)	43
4.3.2	Comportamiento del NPV ante variaciones del precio.....	45
4.4	Análisis integrado mediante Hill of Value (HOV).....	47
4.4.1	Estructura general de resultados.....	47
4.4.2	Superficie HOV para precio de 3.50 US\$/lb	47
4.4.3	Superficie HOV para precio de 3.75 US\$/lb	49
4.4.4	Superficie HOV para precio de 4.00 US\$/lb	50
4.4.5	Superficie HOV para precio de 4.25 US\$/lb (Caso Base).....	52
4.4.6	Superficie HOV para precio de 4.50 US\$/lb	53
4.4.7	Superficie HOV para precio de 4.75 US\$/lb	54
4.4.8	Superficie HOV para precio de 5.00 US\$/lb	56
4.5	Prueba de hipótesis.....	57
	Conclusiones	60
	Recomendaciones	61
	Referencias bibliográficas.....	62
	Anexos	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	6
Tabla 2 : Costos mineros totales del Depósito Satélite Norte.....	21
Tabla 3 : Costos unitarios del Depósito Satélite Norte	22
Tabla 4 : Precios oficiales del cobre (Forecast 2025–2029).....	23
Tabla 5 : Escenarios de precio del cobre para el LOM.....	23
Tabla 6 : CAPEX total para expansión de throughput (+12 Mt).....	24
Tabla 7 : Escenarios de throughput evaluados	26
Tabla 8 : Escenarios de reservas satélite evaluados.....	27
Tabla 9 : Escenarios evaluados (Throughput x Reservas).....	28
Tabla 10: Perfil anual de producción (Caso T34–R257).....	29
Tabla 11: Tonelajes base por escenario	32
Tabla 12: OPEX por escenario (MUSD).....	33
Tabla 13: Costos de inversión aplicados.....	34
Tabla 14: Evaluación económica con CAPEX 500 MUSD.....	35
Tabla 15: Evaluación económica con CAPEX 350 MUSD.....	36
Tabla 16: Evaluación económica con CAPEX 400 MUSD.....	36
Tabla 17: Evaluación económica con CAPEX 450 MUSD.....	37
Tabla 18: Evaluación económica con CAPEX 550 MUSD.....	37
Tabla 19: Evaluación económica con CAPEX 600 MUSD.....	37
Tabla 20: Evaluación económica con CAPEX 650 MUSD.....	38
Tabla 21: NPV según CAPEX y reservas (Throughput fijo).....	42
Tabla 22: NPV según Precio del Cobre y Throughput (Reserva fija = 322 Mt)	44
Tabla 23: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 3.50 US\$/lb).....	48
Tabla 24: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 3.75 US\$/lb).....	49
Tabla 25: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.00 US\$/lb).....	51
Tabla 26: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.25 US\$/lb).....	52

Tabla 27: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.50 US\$/lb).....	53
Tabla 28: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.75 US\$/lb).....	55
Tabla 29: NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 5.00 US\$/lb).....	56
Tabla 30: Estadísticos descriptivos para NPV_T46 y NPV_T34.....	57
Tabla 31: Resultados de la prueba t pareada	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 500 MUSD)	35
Figura 2 : NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 550 MUSD)	38
Figura 3 : NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 600 MUSD)	39
Figura 4 : NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 650 MUSD)	39
Figura 5 : Superficie HOV CAPEX vs Reservas.....	42
Figura 6 : Superficie Hill of Value (HOV) Precio–Throughput (322 Mt).....	45
Figura 7 : Superficie Hill of Value para Precio 3.50 US\$/lb	48
Figura 8 : Superficie Hill of Value para Precio 3.75 US\$/lb	50
Figura 9 : Superficie Hill of Value para Precio 4.00 US\$/lb	51
Figura 10: Superficie Hill of Value para Precio 4.25 US\$/lb	53
Figura 11: Superficie Hill of Value para Precio 4.50 US\$/lb	54
Figura 12: Superficie Hill of Value para Precio 4.75 US\$/lb	55
Figura 13: Superficie Hill of Value para Precio 5.00 US\$/lb	56
Figura 14: Histograma de diferencias Δ NPV	59

Glosario

NPV / VAN:

Net Present Value / Valor Actual Neto.

IRR / TIR:

Internal Rate of Return / Tasa Interna de Retorno.

CAPEX:

Capital Expenditure.

OPEX:

Operational Expenditure.

LOM:

Life of Mine. Vida útil total del proyecto.

HOV:

Hill of Value.

Mt:

Million tonnes. Millones de toneladas

TRR:

Treatment and Refining Charges. Cargos por tratamiento y refinación aplicados a la venta de concentrado.

NSR:

Net Smelter Return. Ingreso neto recibido tras descontar TRR, penalidades y deducciones comerciales

Introducción

La industria minera moderna se desarrolla en un entorno altamente competitivo, donde las decisiones de inversión y planificación deben basarse en análisis económicos integrales que permitan optimizar el uso de recursos, maximizar la rentabilidad y garantizar la sostenibilidad de las operaciones. En este contexto, la capacidad de procesamiento de mineral y la disponibilidad de reservas explotables son factores determinantes para asegurar la continuidad operativa y el crecimiento de una unidad minera. La relación entre ambos elementos adquiere especial relevancia cuando se evalúan proyectos de expansión de planta o la integración de yacimientos satélite, cuyo impacto económico puede modificar sustancialmente el horizonte productivo y el valor del negocio.

La presente investigación se centra en el análisis económico y estratégico de incrementar el throughput de una operación minera, integrando un proyecto satélite de cobre como fuente adicional de mineral. El estudio evalúa si la expansión de la planta de procesamiento —de 34 Mt/año a 46 Mt/año— genera un mayor valor presente neto (NPV) en comparación con el caso base, considerando distintos niveles de reservas, variaciones del CAPEX y escenarios de precio del cobre. Para ello, se emplea un modelo económico corporativo y la metodología Hill of Value (HOV), que permite analizar simultáneamente la interacción entre capacidad instalada, inventarios minerales y condiciones de mercado.

El Capítulo I presenta las generalidades del estudio, la descripción del problema de investigación, los objetivos, hipótesis, variables y antecedentes referenciales. Estos elementos permiten contextualizar la necesidad de evaluar integralmente la expansión de planta y justificar la importancia de analizar la interacción entre reservas satélite y capacidad de procesamiento.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, abordando los fundamentos de la evaluación económica de proyectos mineros, el uso del NPV como métrica principal, la influencia del CAPEX y OPEX en decisiones de expansión, la relevancia del precio del

cobre y la aplicación del enfoque Hill of Value como herramienta estratégica para la toma de decisiones.

El Capítulo III corresponde al desarrollo metodológico. Se detalla la recopilación de información técnica y económica, la definición y modelamiento de los 24 escenarios evaluados, la construcción de perfiles anuales de producción y la integración de los datos en el modelo financiero corporativo.

El Capítulo IV presenta el análisis y discusión de resultados. Aquí se comparan los NPVs del caso base y los escenarios expandidos, se analizan las superficies HOV, se evalúan las sensibilidades de reservas, CAPEX y precio del cobre, y se valida estadísticamente la hipótesis planteada mediante una prueba T pareada.

En conjunto, esta investigación busca demostrar que las decisiones sobre expansión de planta deben basarse en una evaluación integral que considere simultáneamente el inventario de reservas, la inversión requerida y las condiciones del mercado, estableciendo un modelo de análisis que puede servir como referencia para futuras evaluaciones estratégicas en minería.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En las operaciones mineras de tajo abierto dedicadas a la producción de cobre, la rentabilidad del negocio depende en gran medida de la capacidad de integrar de forma eficiente la mina y la planta de procesamiento. La mayor parte del valor económico se genera a través del tratamiento continuo de grandes volúmenes de mineral, por lo que el throughput de planta se convierte en uno de los parámetros operativos más relevantes. Un nivel de procesamiento insuficiente puede desaprovechar reservas ya descubiertas, mientras que un nivel de procesamiento sobredimensionado, sin respaldo geológico, puede conducir a inversiones de capital que no se recuperan en el horizonte de vida de mina.

En este contexto, las compañías mineras de gran escala suelen estructurar sus decisiones de inversión alrededor de un Plan de Vida de Mina (LOM), en el que se define una secuencia de explotación, un perfil de producción y un throughput de diseño que orientan tanto las metas operativas como los compromisos financieros. Sin embargo, la realidad geológica y de mercado es dinámica: aparecen nuevas zonas mineralizadas en el entorno de la operación, cambian las leyes de cabeza, se ajustan los precios de los metales y se modifican los costos de capital y operación. Estas variaciones obligan a revisar periódicamente si el LOM vigente sigue siendo el que maximiza el valor económico del proyecto.

Dentro de estas revisiones estratégicas, cobra particular importancia la evaluación de proyectos satélite cercanos a la operación principal. La posibilidad de incorporar un tajo adicional que alimente la planta existente ofrece, en principio, la oportunidad de incrementar el throughput y adelantar producción, aprovechando sinergias en infraestructura, equipos y servicios. No obstante, dicha integración no es trivial: requiere analizar de forma conjunta la cantidad y calidad de reservas del satélite, la secuencia de

minado, la capacidad máxima de la planta y el CAPEX adicional necesario para aumentar la capacidad de tratamiento.

La expansión de planta, especialmente cuando implica la instalación de una tercera línea de molienda y flotación, supone inversiones del orden de cientos de millones de dólares. Estas decisiones se enfrentan, además, a un entorno de precios del cobre volátil y a una exigencia creciente por parte de las compañías de que cada dólar invertido genere un retorno claramente superior al caso de no invertir. En consecuencia, las evaluaciones deben ir más allá de un simple contraste entre un escenario “con expansión” y otro “sin expansión”: se requiere explorar distintos niveles de throughput, distintos inventarios de reservas y diferentes hipótesis de precio para identificar realmente el punto donde el proyecto maximiza su Valor Presente Neto (NPV).

De esta manera, el análisis de la conveniencia de incrementar el throughput de planta en una operación de cobre de tajo abierto se ubica en la intersección de tres dimensiones clave: geológica (volumen y ley de reservas), operacional (capacidad de mina y planta) y económica-financiera (CAPEX, OPEX y precios de mercado). La investigación que se desarrolla en esta tesis se inserta en este contexto general, buscando comprender cómo la disponibilidad de reservas de un proyecto satélite y las condiciones de mercado condicionan la decisión de expandir o no la capacidad de tratamiento de mineral.

1.2 Descripción del problema de investigación

Las operaciones mineras enfrentan una limitación estratégica significativa derivada de la falta de una integración adecuada entre el análisis económico del throughput de planta y la evaluación técnica de las reservas provenientes de proyectos satélites. A pesar de disponer de un portafolio de zonas mineralizadas con potencial para complementar la producción de la operación principal, la unidad minera no realiza una evaluación integral que combine, en un mismo marco analítico, el efecto económico de un posible aumento del throughput de la planta con el inventario de reservas actuales y potenciales asociadas a dichos proyectos satélites.

Esta omisión genera una brecha crítica en la capacidad de planificación estratégica, pues impide demostrar de manera cuantitativa la viabilidad y rentabilidad de operar a mayores niveles de procesamiento y, al mismo tiempo, limita la comprensión del verdadero aporte económico de las reservas remanentes. Como consecuencia directa, la operación no logra identificar el escenario óptimo que maximiza el Valor Presente Neto (NPV), restringiendo así la toma de decisiones informadas en un entorno donde la optimización de recursos y la maximización de la rentabilidad son fundamentales para asegurar la sostenibilidad del negocio.

En este escenario, el problema general que enfrenta la operación minera se sintetiza en lo siguiente:

1.2.1 Problema general

La falta de integración y análisis económico del impacto de un posible aumento del throughput de planta y la explotación de nuevas reservas en proyectos satélites impide maximizar el Valor Presente Neto (NPV) y limita la toma de decisiones estratégicas en las operaciones mineras.

A partir de este problema central, se derivan los siguientes problemas específicos que evidencian las principales brechas técnicas y económicas en la evaluación actual:

1.2.2 Problemas específicos

- La inadecuada evaluación técnico-económica de las reservas actuales y potenciales limita el conocimiento de su contribución al Valor Presente Neto (NPV) bajo escenarios de mayor throughput.
- La ausencia de un análisis integral para la evaluación de alternativas estratégicas (como la integración de nuevos proyectos satélites y el incremento del throughput) dificulta la identificación del caso que genere el mayor valor económico para la unidad minera.
- La carencia de una cuantificación financiera robusta del impacto asociado a diferentes niveles de aumento del throughput impide determinar la rentabilidad real

de cada escenario, afectando directamente la optimización de ingresos, así como de los costos operativos y de capital.

En conjunto, estas brechas definen con precisión la problemática de investigación: la unidad minera no cuenta con un marco analítico que permita evaluar de manera simultánea el throughput de planta, las reservas satélites y las inversiones requeridas, imposibilitando identificar el escenario que maximiza el valor económico del proyecto.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Determinar el escenario que maximiza el Valor Presente Neto (NPV) de la operación minera, mediante la evaluación integral de la interacción entre el throughput de planta, el CAPEX de expansión y los niveles de reservas satélite.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar técnico-económicamente las reservas actuales y potenciales bajo diferentes capacidades de planta, con el propósito de determinar su contribución marginal al NPV y establecer el volumen mínimo de reservas requerido para sustentar una expansión.
- Comparar escenarios estratégicos que combinan incrementos de throughput y distintos inventarios de reservas, identificando el caso operativo que genere el mayor valor económico para la unidad minera.
- Cuantificar el impacto financiero de los niveles crecientes de throughput y del CAPEX asociado a la expansión, evaluando su sensibilidad sobre el NPV bajo diferentes supuestos de precios del cobre.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La integración de nuevos proyectos cercanos a la operación, el aumento del throughput y la evaluación de reservas permitirán maximizar el Valor Presente Neto (NPV) de la operación, generando un valor económico superior al del escenario actual.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La reevaluación técnico-económica de las reservas, bajo escenarios de mayor throughput, mejorará la rentabilidad de la unidad minera.
- El desarrollo de un caso óptimo que integre estratégicamente el aumento del throughput y el plan de minado de reservas permitirá generar el mayor valor económico para la unidad minera.
- El análisis financiero de los diferentes niveles de aumento de throughput concluirá que la optimización operativa y de capital maximizará la rentabilidad de la operación.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable independiente (V.I)

Aumento del throughput de planta y volumen de reservas integradas al plan de minado.

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

- Valor económico de la operación (NPV).
 - NPV del caso base (MUSD).
 - NPV de los escenarios con incremento de throughput (MUSD).
 - Δ NPV respecto al caso base (MUSD).
- Contribución técnica y económica de las reservas.
 - Volumen de reservas requeridas para igualar/superar el caso base (Mt).
 - Vida de mina resultante por escenario (años).
- Impacto financiero operativo y de capital.
 - Variación de ingresos por escenario (MUSD).
 - Costos operativos unitarios (US\$/t).
 - Costos de capital asociados (CAPEX; MUSD).

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>Problema general La falta de integración y análisis económico del impacto de un posible aumento del throughput de planta y la explotación de nuevas reservas en proyectos satélites impide maximizar el Valor Presente Neto (NPV) y limita la toma de decisiones estratégicas en las operaciones mineras.</p>	<p>Objetivo general Determinar el escenario que maximiza el Valor Presente Neto (NPV) de la operación minera, mediante la evaluación integral de la interacción entre el throughput de planta, el CAPEX de expansión y los niveles de reservas satélite.</p>	<p>Hipótesis general La integración de nuevos proyectos cercanos a la operación, el aumento del throughput y la evaluación de reservas permitirán maximizar el Valor Presente Neto (NPV) de la operación, generando un valor económico superior al del escenario actual.</p>			<p>Tipo y Diseño Tipo: Aplicada Diseño: No Experimental, transversal y correlacional-causal.</p> <p>Técnicas e Instrumentos Técnica: Modelación Financiera y simulación de escenarios. Instrumento: Software de minería y hojas de cálculo financiero. Unidad de Análisis: Mina a Tajo Abierto.</p>
<p>Problema específico 1 La inadecuada evaluación técnico-económica de las reservas actuales y potenciales limita el conocimiento de su contribución al Valor Presente Neto (NPV) bajo escenarios de mayor throughput.</p>	<p>Objetivo específico 1 Evaluar técnico-económicamente las reservas actuales y potenciales bajo diferentes capacidades de planta, con el propósito de determinar su contribución marginal al NPV y establecer el volumen mínimo de reservas requerido para sustentar una expansión.</p>	<p>Hipótesis específica 1 La reevaluación técnico-económica de las reservas, bajo escenarios de mayor throughput, mejorará la rentabilidad de la unidad minera.</p>	<p>X1: Independiente / Causa</p> <p>Throughput de Planta</p> <p>Inversión de Capital (CAPEX)</p> <p>Reservas</p>	<p>Y1: Dependiente / Efecto</p> <p>NPV</p>	
<p>Problema específico 2 La ausencia de un análisis integral para la evaluación de alternativas estratégicas (como la integración de nuevos proyectos satélites y el incremento del throughput) dificulta la identificación del caso que genere el mayor valor económico para la unidad minera</p>	<p>Objetivo específico 2 Comparar escenarios estratégicos que combinan incrementos de throughput y distintos inventarios de reservas, identificando el caso operativo que genere el mayor valor económico para la unidad minera.</p>	<p>Hipótesis específica 2 El desarrollo de un caso óptimo que integre estratégicamente el aumento del throughput y el plan de minado de reservas permitirá generar el mayor valor económico para la unidad minera.</p>			

Problema específico 3

La carencia de una cuantificación financiera robusta del impacto asociado a diferentes niveles de aumento del throughput impide determinar la rentabilidad real de cada escenario, afectando directamente la optimización de ingresos, así como de los costos operativos y de capital.

Objetivo específico 3

Cuantificar el impacto financiero de los niveles crecientes de throughput y del CAPEX asociado a la expansión, evaluando su sensibilidad sobre el NPV bajo diferentes supuestos de precios del cobre.

Hipótesis específica 3

El análisis financiero de los diferentes niveles de aumento de throughput concluirá que la optimización operativa y de capital maximizará la rentabilidad de la operación.

Nota: Elaboración propia

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Newcrest Mining “Cadia East Expansion (Australia) – Prefeasibility Study Report, Newcrest Mining Limited, 2017.”

Newcrest Mining desarrolló un estudio de pre-factibilidad para la expansión del proyecto Cadia, evaluando incrementar el throughput de la planta de 33 Mt/año a 39 Mt/año. El estudio demostró que el aumento del procesamiento genera un incremento significativo del valor presente neto (NPV), debido principalmente a la mayor producción temprana de cobre y oro y a las economías de escala asociadas.

El informe concluyó que un mayor throughput, cuando está respaldado por reservas suficientes y un CAPEX competitivo, puede incrementar de forma sustancial el valor económico del proyecto. Este caso constituye un antecedente directo para la presente investigación, pues evidencia cómo la expansión de capacidad debe evaluarse de manera conjunta con la disponibilidad de reservas.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Baca, P. et al. (2016). “Valorización de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.”

Este estudio analiza la expansión de Cerro Verde, que incrementó su capacidad de procesamiento de 120,000 tpd a 360,000 tpd con una inversión de 4,600 MUSD. La investigación demostró que el aumento del throughput genera un incremento sustancial en la producción de cobre y molibdeno, elevando el NPV del proyecto.

Este caso peruano confirma que incrementos significativos en la capacidad de molienda pueden maximizar el valor económico cuando están respaldados por reservas y un CAPEX adecuadamente planificado.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Evaluación económica de proyectos mineros*

La evaluación económica de proyectos es una disciplina central en la industria minera y un componente indispensable en la justificación de inversiones, manejo de riesgos y definición del tamaño óptimo de operación. Samis (2011) señala que esta evaluación integra principios de finanzas corporativas, que establecen el valor temporal del dinero, con elementos provenientes de la economía de los recursos naturales, donde la finitud de los yacimientos implica que la secuencia y ritmo de extracción afectan directamente el valor generado por el proyecto.

Otto (2006) explica que el objetivo esencial de este tipo de evaluación es determinar si un proyecto —ya sea una nueva mina o una expansión de una operación existente— crea valor para los inversionistas. Para ello, se estiman los flujos de caja proyectados que surgen de la explotación del yacimiento y se comparan con los costos necesarios para desarrollar, operar y eventualmente expandir la capacidad instalada. Esta comparación debe tener en cuenta la incertidumbre geológica, la volatilidad de los precios de los metales y la variación en los costos de operación.

Smith (2018) destaca que la evaluación económica minera no se limita a calcular la rentabilidad, sino que constituye una herramienta estratégica que orienta decisiones de asignación de capital, priorización de proyectos, evaluación de riesgos y optimización del portafolio de activos mineros. Bajo esta perspectiva, la evaluación debe incluir análisis de sensibilidad, escenarios, proyecciones de vida de mina y revisiones iterativas del diseño técnico en función de los resultados económicos.

2.1.2 *Valor Presente Neto (NPV) aplicado a minería*

El Valor Presente Neto (NPV) es el principal indicador para evaluar la conveniencia económica de un proyecto minero, dada su capacidad para integrar la magnitud, el tiempo y el riesgo de los flujos de caja. Brealey, Myers y Allen (2020) señalan que un NPV positivo

implica que el proyecto genera un retorno superior al costo de oportunidad del capital, mientras que un NPV negativo indica destrucción de valor.

El NPV descuenta los flujos de caja futuros a una tasa que refleja el riesgo del proyecto y las condiciones financieras de la empresa. Este método permite comparar alternativas mutuamente excluyentes — como expandir o no expandir una planta de procesamiento — bajo un criterio objetivo y directamente asociado a la creación de valor económico.

Aunque otras métricas como la Tasa Interna de Retorno (TIR), el período de recuperación o el índice de rentabilidad pueden aportar información complementaria, el NPV sigue siendo la medida dominante, especialmente en minería, donde los flujos de caja suelen ser intensivos en etapas tempranas y la vida útil de los activos puede extenderse durante varias décadas.

En expansiones mineras, el análisis incremental del NPV es crítico. Samis (2011) subraya que la decisión de aumentar la capacidad de procesamiento debe evaluarse comparando estrictamente el valor adicional generado frente al costo de capital requerido, asegurando que el beneficio marginal supere al gasto marginal.

2.1.3 Variables críticas en la evaluación minera

La rentabilidad y viabilidad de un proyecto minero está determinada por un conjunto de variables críticas cuya interacción configura el desempeño económico del proyecto. Otto (2006) destaca que estas variables deben evaluarse de manera conjunta, ya que cambios en una pueden modificar significativamente el efecto de las demás.

Entre estas variables destacan:

2.1.3.1 Reservas mineras. Las reservas constituyen la base geológica sobre la cual se construye toda la evaluación económica minera. De acuerdo con Peters (Exploration and Mining Geology), una reserva minera representa un recurso natural que ha sido caracterizado geológicamente y puede ser explotado de forma económica bajo condiciones técnicas, metalúrgicas y financieras específicas. Esta clasificación se encuentra regulada internacionalmente por estándares como NI 43-101 en Canadá y el

JORC Code en Australia, los cuales establecen criterios estrictos para reportar recursos y reservas, garantizando transparencia y confiabilidad.

Wellmer & Dalheimer (2019) destacan que el volumen de reservas determina la duración del proyecto (Life of Mine, LOM), mientras que la ley del mineral influye directamente en los ingresos por tonelada procesada y en la eficiencia metalúrgica. Por ello, la disponibilidad de reservas y su calidad son variables determinantes en la rentabilidad de una operación minera.

Desde el punto de vista económico, las reservas deben ser evaluadas bajo escenarios realistas de precio, recuperación y costos. Rudolph (Valuation of Mineral Projects) enfatiza que la incorporación de nuevas reservas permite extender la vida de mina, estabilizar la producción y optimizar el uso de la infraestructura instalada, lo cual repercute positivamente en el NPV.

Asimismo, la cantidad de reservas disponibles condiciona directamente la viabilidad de expansiones. Sin un volumen suficiente de mineral, un mayor throughput podría adelantar la producción hasta agotar prematuramente el yacimiento, generando un impacto negativo en el valor total del proyecto.

Por tanto, la minería moderna exige integrar la estimación de reservas con la planificación estratégica de mina y planta.

2.1.3.2 Inversión de capital (CAPEX). El CAPEX es el conjunto de inversiones iniciales y de expansión necesarias para desarrollar y operar un proyecto minero. Este incluye costos directos (equipos principales, obras civiles, infraestructura eléctrica, sistemas de transporte, instalaciones de proceso), costos indirectos (ingeniería, administración, seguros, puesta en marcha) y contingencias (Hartman, SME Mining Engineering Handbook).

Samis (2011) resalta que el CAPEX debe analizarse desde un enfoque incremental: la decisión de expandir una planta concentradora debe justificarse únicamente si el valor presente de los flujos de caja adicionales supera la inversión requerida. En minería, donde

las expansiones pueden implicar cientos o miles de millones de dólares, el CAPEX suele ser determinante en la selección del tamaño óptimo del proyecto.

Brealey, Myers y Allen (2020) explican que mientras mayor sea el capital requerido, mayor será la exigencia de retorno para que el proyecto sea atractivo. Este principio financiero se refleja claramente en operaciones mineras donde el CAPEX condiciona tanto la tasa de descuento como el nivel mínimo de ingresos necesarios para alcanzar un NPV positivo.

Por su naturaleza intensiva en infraestructura, las expansiones mineras presentan riesgos adicionales:

- La integración con instalaciones existentes,
- La necesidad de paralizaciones parciales,
- La coexistencia con sistemas antiguos,
- La incertidumbre en costos no previstos.

Stermole & Stermole recomiendan que todo CAPEX minero incluya análisis de riesgo, contingencias, rangos probabilísticos y revisiones iterativas de costos, especialmente en proyectos brownfield.

Incluye los costos iniciales para la construcción de infraestructura minera, planta de procesamiento, transporte, energía, equipos y facilidades auxiliares. Samis (2011) señala que un CAPEX elevado requiere flujos de caja robustos para justificar la inversión.

2.1.3.3 Throughput o capacidad de planta. El throughput representa la cantidad de mineral procesado por unidad de tiempo (generalmente Mt/año). Hartman sostiene que es una de las variables operativas más influyentes en el desempeño global del proyecto, ya que determina la tasa de producción de metal y, por tanto, los flujos de caja del proyecto.

Aumentar el throughput genera efectos económicos positivos y negativos:

Efectos positivos

- Adelanta producción y flujos de caja (efecto temporal).
- Genera economías de escala en ciertos componentes del OPEX.

- Permite aprovechar infraestructura existente o subutilizada.

Efectos negativos

- Incrementa el consumo energético por tonelada si se acerca a límites de diseño.
- Requiere mayor mantenimiento y puede reducir la eficiencia metalúrgica.
- Necesita un inventario mayor de reservas para evitar acortar la vida de mina.
- Puede elevar significativamente el CAPEX de expansión.

Otto (2006) argumenta que el throughput óptimo de una operación minera no es un valor fijo, sino una variable dependiente de las reservas disponibles, del CAPEX requerido y de los precios de mercado.

Por ello, la evaluación económica debe modelar escenarios alternativos de capacidad de planta, incorporando tanto beneficios como costos marginales.

2.1.3.4 Costos operativos (OPEX). El OPEX engloba todos los costos incurridos durante la operación diaria de una mina y una planta concentradora. Estos incluyen costos de energía, reactivos, insumos de molienda (bolas y revestimientos), mano de obra, mantenimiento, transporte interno y manejo de relaves.

Samis (2011) señala que en minería, el OPEX puede representar entre el 40% y el 70% de los costos totales de producción, por lo que su precisión es crítica en la evaluación económica.

Hartman explica que los costos operativos no son lineales respecto al throughput: a medida que aumenta la carga de procesamiento, los equipos se aproximan a sus límites técnicos, incrementándose el desgaste, el consumo energético y los costos de mantenimiento.

Además, Wellmer & Dalheimer (2019) destacan que el OPEX se ve influido por factores geológicos y mineralógicos: un mineral más duro o más arcilloso puede incrementar significativamente el consumo energético y el uso de reactivos, afectando negativamente el NPV.

En expansiones de capacidad, el OPEX marginal —el costo adicional por tonelada adicional procesada— es fundamental. Si el OPEX marginal crece más rápido que los

ingresos marginales, una expansión puede ser técnicamente viable pero económicamente desfavorable.

Por ello, la interacción entre OPEX, throughput y reservas es un componente esencial de cualquier evaluación económica minera.

2.1.4 Análisis de sensibilidad y optimización

La minería enfrenta incertidumbres significativas relacionadas con fluctuaciones de precios, variabilidad geológica, cambios en costos operativos y diferencias en recuperaciones metalúrgicas. Smith (2018) enfatiza que los análisis de sensibilidad permiten identificar los parámetros que más afectan la rentabilidad del proyecto y determinar los escenarios críticos donde la expansión podría dejar de ser viable.

El análisis de sensibilidad también permite identificar rangos de operación robustos, es decir, escenarios donde el proyecto mantiene un NPV positivo frente a condiciones adversas. La optimización de un proyecto minero no consiste únicamente en identificar el escenario de mayor valor, sino en encontrar configuraciones que ofrezcan resiliencia frente a la volatilidad del mercado.

2.1.5 El enfoque Hill of Value (HOV)

El enfoque Hill of Value (HOV) constituye una metodología avanzada de evaluación económica utilizada en la industria minera para analizar la interacción simultánea entre tres variables estratégicas: la capacidad de procesamiento de la planta (throughput), el volumen de reservas disponibles y el precio del metal. A diferencia de los análisis tradicionales que evalúan estas variables de manera aislada o mediante sensibilidades independientes, el HOV construye un modelo tridimensional que permite visualizar cómo las combinaciones de dichas variables afectan el Valor Presente Neto (NPV) de una operación minera.

Desde una perspectiva conceptual, el HOV surge como una evolución de las metodologías de optimización económica aplicadas en minería, integrando principios de economía de escala, agotamiento de reservas, volatilidad de precios y análisis marginal de flujos. Tal como plantean Samis (2011) y Otto (2006), en minería las decisiones

estratégicas no pueden tomarse considerando únicamente el flujo de caja medio; debe explorarse un espacio multidimensional de alternativas, dado que pequeñas modificaciones en parámetros como la capacidad de planta o el tamaño del inventario geológico pueden generar cambios significativos en la trayectoria económica del proyecto.

La idea fundamental del HOV consiste en representar el NPV como una superficie continua sobre un plano de dos dimensiones constituido por el throughput y las reservas, mientras que el precio del metal puede considerarse como un parámetro adicional que desplaza verticalmente la superficie. Esta representación genera una “colina de valor” en la que los puntos más altos corresponden a las combinaciones que maximizan el NPV.

Dicho enfoque permite identificar varias condiciones críticas:

El throughput óptimo económico.

El HOV muestra que el throughput óptimo no es un valor fijo definido por la ingeniería de planta, sino que depende del volumen de reservas disponibles y de las condiciones económicas. Un aumento en el throughput puede elevar el NPV si existe mineral suficiente para sostener el procesamiento adicional; de lo contrario, adelanta producción hasta agotar el mineral demasiado pronto, reduciendo el valor total del proyecto. Esto es coherente con la visión de Hartman (SME Mining Engineering Handbook), quien subraya que la capacidad de planta debe alinearse con el horizonte de explotación y el inventario de mineral.

El umbral económico mínimo de reservas requerido para justificar una expansión.

La superficie del HOV exhibe zonas donde, para ciertos niveles de throughput, el NPV es inferior al escenario base debido a que las reservas no permiten sostener la operación a una mayor escala. Este fenómeno ha sido descrito por Wellmer & Dalheimer (2019), quienes indican que la falta de reservas suficientes puede convertir un proyecto técnicamente viable en económicamente inviable.

El HOV permite visualizar este umbral como una frontera que separa escenarios económicamente favorables y desfavorables.

La sensibilidad del NPV a variaciones del precio del metal.

El precio del metal puede incorporarse como una tercera dimensión complementaria, desplazando la colina de valor hacia arriba o hacia abajo. En condiciones de precios altos, el throughput óptimo suele desplazarse hacia valores mayores debido a que cada tonelada adicional de mineral procesado genera mayor contribución al margen operativo. En condiciones de precios bajos, la colina se aplana y la expansión puede dejar de ser rentable, aun cuando existan suficientes reservas. Clemen & Reilly (Making Hard Decisions) destacan que este tipo de análisis multidimensional es fundamental en la toma de decisiones bajo incertidumbre.

La identificación de zonas estables y zonas de riesgo.

El HOV no solo revela el punto óptimo, sino que muestra cómo se comporta el NPV alrededor de dicho punto. Zonas amplias de alto valor indican escenarios robustos, donde pequeñas variaciones en reservas o throughput no afectan significativamente el resultado. Zonas estrechas o inclinadas indican escenarios frágiles, altamente sensibles a perturbaciones. Esto permite adoptar decisiones estratégicas más conservadoras o más agresivas según el perfil de riesgo de la organización.

La evaluación simultánea de alternativas estratégicas.

A diferencia de los métodos convencionales, donde cada alternativa (por ejemplo, throughput bajo, medio y alto) se evalúa como proyectos independientes, el HOV permite analizar todas las alternativas como parte de una superficie continua. Esto facilita una visión global del desempeño económico de la operación, alineada con las recomendaciones de Otto (2006) y Samis (2011), quienes sostienen que las minas deben evaluarse como sistemas integrados donde la planta, la mina y el mercado constituyen un conjunto dinámico.

Su aplicación en estudios reales de clase mundial.

El HOV ha sido utilizado en estudios de pre-factibilidad y factibilidad en operaciones como Cadia East (Newcrest Mining), Cobre Panamá (First Quantum) y Oyu Tolgoi

(Turquoise Hill), donde la escala de las inversiones y la magnitud de los recursos requieren herramientas que permitan optimizar decisiones a partir de múltiples variables simultáneas.

Desde una perspectiva metodológica, el enfoque HOV resulta especialmente adecuado para contextos donde:

- Existe incertidumbre geológica significativa,
- Se evalúan expansiones de capacidad con fuertes requerimientos de CAPEX,
- Los precios de los metales muestran ciclos prolongados,
- La operación cuenta con múltiples fuentes de mineral (por ejemplo, proyectos satélite),
- La empresa busca definir un throughput óptimo desde un enfoque económico, no solo técnico.

En síntesis, el Hill of Value proporciona una visión holística y multidimensional del valor económico de una operación minera, permitiendo identificar el nivel de capacidad de planta que maximiza el valor del proyecto bajo diversas condiciones de reservas y precios. Su utilidad radica precisamente en mostrar la estructura del valor, en lugar de limitarse a comparar escenarios discretos; esto transforma la evaluación económica de una minería estática a una minería optimizada.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 NPV

Métrica financiera que calcula el valor actual de los flujos de caja futuros de un proyecto, descontados a una tasa de oportunidad. Un NPV positivo indica que el proyecto crea valor y es económicamente viable.

2.2.2 Throughput

Medida de la cantidad de material (mineral) que una planta de procesamiento puede manejar en una unidad de tiempo (por ejemplo, toneladas por día o año).

2.2.3 Reservas

Cantidad de mineral que se ha demostrado que puede ser extraída de manera económicamente rentable, considerando factores técnicos, económicos y de mercado.

2.2.4 CAPEX

Los desembolsos de dinero que se requieren para adquirir, construir o mejorar activos fijos (maquinaria, infraestructura, equipos) en una operación minera.

2.2.5 OPEX

Son los costos operativos o de funcionamiento diario de un proyecto.

2.2.6 Sensibilidad

Herramienta de gestión de riesgos que examina cómo el NPV de un proyecto se ve afectado por cambios en sus variables críticas (ej. precio del metal, CAPEX, throughput), para identificar los factores de mayor impacto en la rentabilidad.

2.2.7 LOM (Life of Mine)

Horizonte temporal total durante el cual un yacimiento puede ser explotado de manera económica, considerando la secuencia de minado, las reservas disponibles, el throughput de planta y los planes de expansión. El LOM determina la vida útil del proyecto y condiciona el flujo de caja total que puede generar.

2.2.8 Escenarios

Conjuntos de condiciones alternativas bajo las cuales se evalúa un proyecto minero. Pueden incluir variaciones en throughput, reservas, CAPEX, precios del metal, leyes o recuperaciones. Los escenarios permiten comparar resultados, identificar configuraciones óptimas y analizar el comportamiento del proyecto bajo diferentes supuestos de mercado o de operación.

2.2.9 Producción

Cantidad de metal fino generado por la operación minera en un periodo determinado. La producción depende del throughput, de la ley del mineral y de la recuperación metalúrgica. Es una de las principales fuentes de generación de ingresos y condiciona los flujos de caja del proyecto.

2.2.10 Expansión

Proceso mediante el cual una operación minera aumenta su capacidad instalada, ya sea en la mina, la planta o ambos componentes. Una expansión puede incluir la

instalación de una tercera línea de molienda, ampliación de circuitos metalúrgicos o crecimiento de infraestructura auxiliar. Su viabilidad depende del análisis incremental de NPV y de la disponibilidad de reservas suficientes.

2.2.11 Rentabilidad

Capacidad de un proyecto para generar beneficios económicos por encima de sus costos. En minería, la rentabilidad se mide mediante indicadores como el NPV, la TIR y el margen operativo. La rentabilidad depende de la eficiencia operativa, la calidad de las reservas, los costos y los precios del mercado.

2.2.12 Optimización

Proceso de identificar la configuración operativa o económica que maximiza el valor del proyecto. En minería incluye optimizar el throughput, el plan de minado, la secuencia de explotación, la mezcla de mineral y el uso del CAPEX. Herramientas como análisis marginal, programación matemática y Hill of Value permiten buscar soluciones óptimas.

2.2.13 Incertidumbre

Condición inherente a la industria minera asociada a variaciones geológicas, volatilidad de los precios del metal, fluctuaciones en los costos, cambios en recuperaciones metalúrgicas y riesgos operativos. La incertidumbre afecta directamente la toma de decisiones y se gestiona mediante análisis de sensibilidad, escenarios probabilísticos y métodos avanzados de valoración.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 *Unidad de estudio*

La investigación se desarrolla sobre el sistema integrado conformado por:

La Operación Minera Central:

Una unidad minera de tajo abierto actualmente operativa, cuyo throughput nominal es de aproximadamente 34 Mt/año. Esta unidad posee la infraestructura de trituración, molienda y flotación que constituye el caso base para la evaluación económica. Todo análisis de NPV parte desde esta referencia.

El Depósito Satélite Norte:

Un yacimiento externo con potencial para alimentar la planta concentradora en escenarios de expansión. Las reservas confirmadas ascienden a 72 Mt con una ley aproximada de 0.60% Cu, complementadas con un importante volumen de material estéril. Debido a políticas internas, los nombres reales se mantienen en reserva.

El satélite comienza su aporte únicamente a partir del 2035, lo cual permite distinguir claramente el valor marginal de incorporar nuevas reservas en un escenario de vida de mina extendida.

El estudio se enfoca en determinar si la integración del satélite y el aumento del throughput generan un incremento significativo del Valor Presente Neto (NPV), y, en caso afirmativo, en qué condiciones de reservas y precios.

3.1.2 *Datos recolectados*

Los datos recopilados incluyen información técnica, económica y operativa necesaria para modelar los distintos escenarios. Cada grupo de información cumple un rol metodológico específico, por lo que se presentan acompañados de una descripción clara de su propósito y su fuente corporativa.

Costos mineros del Depósito Satélite Norte

Los costos mineros fueron proporcionados como parte del "LRP 2025 S3" corporativo, desagregados entre las actividades realizadas dentro del tajo satélite y el transporte del mineral hacia la plataforma de transferencia y posteriormente hacia la chancadora.

Esta información permite determinar el OPEX marginal del satélite, que será integrado directamente en los modelos de flujo de caja.

A continuación, se presenta la tabla con los costos anuales totalizados:

Tabla 2

Costos mineros totales del Depósito Satélite Norte

RUBRO	Satélite (kUSD)	Plataforma a Planta (kUSD)	Total (kUSD)
Salarios	84,741	11,736	96,477
Alquiler de maquinaria	427,789	3,413	431,202
Servicios (utilities)	19,121	43,120	62,241
Gastos generales	86,118	83	86,240
Combustible	243,710	30,126	273,260
P&V	58,488	-	58,488
Energía eléctrica	1,711	-	1,711
Overhead (gastos indirectos)	22,859	-	22,859
Servicios Técnicos	5,289	-	5,289
Mantenimiento	20,311	2,000	22,311
TOTAL	972,348	68,610	1,040,958

Nota: Elaboración propia

El material total movido asciende a 222 Mt, mientras que el transporte hacia chancadora corresponde a 72 Mt.

Para integrar estos gastos al modelo financiero fue necesario convertirlos a costos unitarios.

Tabla 3*Costos unitarios del Depósito Satélite Norte*

RUBRO	Satélite (USD/t)	Plataforma a Planta (USD/t)
Salarios	0.38	0.16
Alquiler de maquinaria	1.93	0.05
Servicios (utilities)	0.09	0.06
Gastos generales	0.19	0.00
Combustible	1.10	0.42
P&V	0.26	-
Energía eléctrica	0.01	-
Overhead (gastos indirectos)	0.10	-
Servicios Técnicos	0.02	-
Mantenimiento	0.08	0.23
TOTAL	4.38	0.93

Nota: Elaboración propia

Estos valores se incorporaron directamente en los escenarios de flujo de caja para estimar los costos operativos adicionales derivados de utilizar el satélite como nueva fuente de mineral.

Precios del cobre: Forecast y sensibilización LOM

Los precios del cobre utilizados para los años previos a la integración del satélite (2025–2029) provienen del “Budget Deck & Official Price Deck” corporativo (octubre 2024). Su utilización asegura coherencia con los modelos económicos oficiales de la compañía.

Antes de presentar la tabla, es importante señalar que estos precios son fundamentales para construir la parte inicial del flujo de caja y sirven como referencia para evaluar si una expansión genera o no valor antes del ingreso del satélite.

Tabla 4*Precios oficiales del cobre (Forecast 2025–2029)*

AÑO	PRECIO (US\$/lb)
2025	4.10
2026	4.25
2027	4.50
2028	4.50
2029	4.25

Nota: Elaboración propia

A partir de 2030, cuando el satélite comienza a influir en la producción, se requiere evaluar la robustez económica mediante sensibilización del precio del cobre. El análisis se realiza exclusivamente sobre este metal debido a que representa el valor dominante del concentrado.

Tabla 5*Escenarios de precio del cobre para el LOM*

Escenario	Precio (US\$/lb)
S1	3.50
S2	3.75
S3	4.00
S4	4.25
S5	4.50
S6	4.75
S7	5.00

Nota: Elaboración propia

Este conjunto de sensibilidades permite evaluar cómo cambios en el precio del cobre alteran la cantidad mínima de reservas necesarias para justificar una expansión.

CAPEX para expansión de planta

El CAPEX necesario para aumentar el throughput proviene de las estimaciones corporativas y tiene un valor base de 500 MUSD.

Antes de presentar la tabla, se debe señalar que este CAPEX es uno de los tres ejes críticos del modelo:

- CAPEX de 500 MUSD
- Reservas disponibles
- Precio del cobre

El siguiente desglose corresponde a los componentes físicos y financieros de la expansión:

Tabla 6

CAPEX total para expansión de throughput (+12 Mt)

COMPONENTE	MONTO (USD)
Chancadoras de pebbles	8,000,000
Nido de ciclones + bombas Warman 650	133,333,333
Circuito Isamill + celdas cleaner + scavenger + Jameson	222,666,667
Clasificación de relaves (3ra línea rougher)	26,666,667
Muestreadores	16,000,000
Costos indirectos	33,333,333
Contingencia (15%)	60,000,000
Total	500,000,000

Nota: Elaboración propia

Este valor se utiliza para evaluar el NPV incremental al comparar el caso base (34 Mt) con los escenarios de expansión hasta 46 Mt/año.

3.2 Procesamiento de la información

El procesamiento de datos consistió en transformar los insumos anteriores en una estructura económica integrada que permitiera identificar la interacción entre throughput, reservas y precios del cobre.

El trabajo se desarrolló mediante tres etapas metodológicas principales, las cuales corresponden exactamente al proceso seguido por el equipo técnico original:

Análisis de reservas con CAPEX fijo de 500 MUSD.

En esta primera etapa se comparó el NPV del caso base (34 Mt) con el NPV del escenario de expansión (46 Mt), utilizando un precio constante de 4.25 USD/lb para los años 2029 al LOM.

El objetivo fue identificar el volumen mínimo de reservas necesario para que el caso expandido iguale o supere al caso base.

El resultado determinó que 322 Mt constituye el umbral mínimo de reservas satélite requerido para justificar económicamente la expansión de planta bajo estas condiciones.

Sensibilización del CAPEX.

Posteriormente, se evaluó la robustez del escenario de 500 MUSD. Aunque el costo estimado es fijo, se analizaron variaciones relativas del flujo de caja incremental.

Este análisis permitió confirmar que los resultados son altamente sensibles al CAPEX y que valores superiores a los previstos desplazan el umbral de reservas necesarias hacia volúmenes aún mayores.

Sensibilización del precio del cobre.

Finalmente se incorporaron los escenarios de precio (3.50 a 5.00 USD/lb).

El efecto económico fue claro:

- Si el precio del cobre disminuye, el umbral mínimo de reservas para justificar la expansión aumenta significativamente.
- Si el precio del cobre sube, la expansión se vuelve viable con un inventario menor de reservas.

Esta última etapa permitió construir las superficies Hill of Value (HOV), que serán analizadas y discutidas en el Capítulo IV.

3.2.1 Definición de escenarios

Para la evaluación integral mina–planta–proyecto satélite se construyeron 24 escenarios económicos, combinando dos variables estratégicas:

- Throughput de planta (Txx)
- Inventario de reservas satélite (Ryyy)

Con el fin de estandarizar la nomenclatura, cada escenario se expresará de la siguiente manera:

Txx–Ryyy

Donde:

Txx = Capacidad de planta (Mt/año),

Ryyy = Reservas satélites consideradas para el caso (Mt).

Niveles de throughput evaluados (Txx).

Se analizaron cuatro capacidades de planta:

Tabla 7

Escenarios de throughput evaluados

CÓDIGO	THROUGHPUT (mt/AÑO)
T34	34 (caso base)
T40	40
T43	43
T46	46 (expansión máxima)

Nota: Elaboración propia

La opción T46 incorpora el CAPEX de 500 MUSD asociado a la tercera línea de molienda.

Niveles de reservas evaluados (Ryyy).

Los escenarios de reservas utilizados en el análisis no corresponden exclusivamente al inventario geológico confirmado de 72 Mt, sino a diversos niveles conceptuales basados en proyecciones geofísicas.

La evaluación económica requiere explorar volúmenes crecientes para identificar el punto donde el mayor throughput deja de ser marginalmente beneficioso.

Tabla 8*Escenarios de reservas satélite evaluados*

CÓDIGO	RESERVAS (Mt)
R192	192
R257	257
R322	322
R387	387
R452	452
R517	517

Nota: Elaboración propia

Estos valores sirven para identificar el umbral de reservas mínimas necesarias para que un aumento de throughput genere un NPV superior al caso base.

Construcción de los escenarios.

La combinación de Txx x Ryyy genera 24 escenarios en total

Ejemplos:

- T34–R192: caso base
- T34–R322: mayor inventario sin expansión
- T46–R322: expansión con inventario umbral
- T46–R517: expansión con reservas máximas estimadas

Estos escenarios constituyen la base para todas las comparaciones de NPV, curvas de sensibilidad, perfiles anuales y superficies Hill of Value (HOV).

Tabla 9*Escenarios evaluados (Throughput x Reservas)*

ESCENARIO	THROUGHPUT (mt/AÑO)	RESERVA SATÉLITE (mt)
T34-R192	34	192
T34-R257	34	257
T34-R322	34	322
T34-R387	34	387
T34-R452	34	452
T34-R517	34	517
T40-R192	40	192
T40-R257	40	257
T40-R322	40	322
T40-R387	40	387
T40-R452	40	452
T40-R517	40	517
T43-R192	43	192
T43-R257	43	257
T43-R322	43	322
T43-R387	43	387
T43-R452	43	452
T43-R517	43	517
T46-R192	46	192
T46-R257	46	257
T46-R322	46	322
T46-R387	46	387
T46-R452	46	452
T46-R517	46	517

Nota: Elaboración propia**3.2.2 Perfiles de producción anual por escenario (mina principal + satélite)**

Como parte del procesamiento técnico de los datos, se construyeron los perfiles anuales de producción (envolventes) para cada uno de los 24 escenarios modelados, combinando:

- El aporte anual de la mina principal,

- El aporte anual del yacimiento satélite,
- La duración del proyecto en función del nivel de reservas,
- El cumplimiento del throughput nominal según cada capacidad instalada (34, 40, 43 o 46 Mt/año).

Esta etapa es fundamental, porque permite verificar la viabilidad operativa de cada escenario antes de su valoración económica. Los perfiles anuales constituyen la base directa para el cálculo de los flujos de caja en el modelo corporativo.

3.2.2.1 Construcción de los perfiles de producción. Para cada caso Txx–Ryyy se generó una tabla anual que consolida:

- El tonelaje de mineral alimentado desde la mina principal,
- El tonelaje aportado por el satélite,
- El throughput total por año,
- El año de agotamiento de la mina principal,
- El año de agotamiento del satélite,
- La caída final del throughput una vez agotadas las reservas del conjunto.

A modo ilustrativo, se presenta el perfil correspondiente al escenario T34–R257 (34 Mt/año y 257 Mt de reservas satélite):

Tabla 10

Perfil anual de producción (Caso T34–R257)

AÑO	PRINCIPAL (Mt)	SATÉLITE (Mt)	TOTAL (Mt)
2025	31.4	0.0	31.4
2026	32.0	0.0	32.0
2027–2034	34.0	0.0	34.0
2035–2042	22.0	12.0	34.0
2043	5.3	28.7	34.0
2044	0.0	34.0	34.0
2047	0.0	30.3	30.3

Nota: Elaboración propia

Este mismo procedimiento se aplicó a todos los escenarios, lo que permitió obtener una envolvente completa de producción anual para cada combinación de throughput y reservas.

Con base en los perfiles anuales de alimentación previamente construidos, se generaron 24 gráficos de barras, uno para cada combinación de capacidad de planta y nivel de reservas.

Cada gráfico integra visualmente:

- El throughput anual total,
- El aporte de la mina principal,
- El aporte del yacimiento satélite,
- Los periodos de transición entre ambas fuentes de mineral,
- La reducción final del throughput una vez agotadas las reservas disponibles.

La representación gráfica facilita la identificación de aspectos operativos claves, tales como:

- La duración efectiva del aporte satélite
- La estabilidad anual del throughput del sistema
- Los años en los que ocurren cambios significativos en la composición de la alimentación
- Los puntos en los que se produce la declinación final del proyecto.

Los 24 gráficos y tablas se presentarán en los anexos en orden secuencial siguiendo la estructura de escenarios definida en la Sección 3.2.1 (Definición de escenarios).

3.2.3 Construcción del modelo financiero corporativo

Una vez consolidados los costos, tonelajes y perfiles anuales, todos los escenarios se procesaron bajo el modelo económico corporativo, que incluye:

- Valorización de concentrados con parámetros reales,
- Costos de fundición y refinación,
- Deducciones comerciales,

- Penalidades por impurezas,
- Regalías mineras,
- Impuesto a la renta,
- Depreciación de activos,
- Amortización de CAPEX,
- Gastos generales corporativos,
- Costos de cierre.

El precio del cobre fue modelado de la siguiente manera:

- **2025–2029:**

Forecast corporativo (4.10 → 4.50 USD/lb según año).

- **2030 en adelante:**

Precio LOM fijo de 4.25 USD/lb para la evaluación principal.

Todos los escenarios se calcularon con este precio base, y posteriormente se realizó una sensibilización a precios de 3.50, 3.75, 4.00, 4.50, 4.75 y 5.00 USD/lb, cuyo análisis se presentará en el Capítulo 4.

3.2.4 Primera etapa: Análisis de reservas con CAPEX fijo (500 MUSD)

En esta etapa se evaluó la conveniencia económica de incrementar el throughput de planta desde 34 Mt/año hasta 46 Mt/año, asumiendo un CAPEX fijo de 500 MUSD para la tercera línea de molienda.

El análisis comparó el NPV del caso base (T34–Ryyy) contra el NPV del escenario expandido (T46–Ryyy) utilizando un precio de cobre constante de 4.25 US\$/lb entre 2029 y el LOM.

3.2.4.1 Matriz de tonelajes utilizados. La siguiente tabla 11 muestra los tonelajes base de mineral, desmonte y total movido para los escenarios representativos:

Tabla 11*Tonelajes base por escenario*

ESCENARIO	Mineral (Mt)	Desmonte (Mt)	Total Minado (Mt)	Remanejo (Mt)	Total Movido (Mt)
T34-R192	192	400	592	192	784
T34-R257	257	535	792	257	1,049
T34-R322	322	671	993	322	1,315
T34-R387	387	806	1,193	387	1,580
T34-R452	452	942	1,394	452	1,846
T34-R517	517	1,076	1,593	517	2,110
T40-R192	192	400	592	192	784
T40-R257	257	535	792	257	1,049
T40-R322	322	671	993	322	1,315
T40-R387	387	806	1,193	387	1,580
T40-R452	452	942	1,394	452	1,846
T40-R517	517	1,076	1,593	517	2,110
T43-R192	192	400	592	192	784
T43-R257	257	535	792	257	1,049
T43-R322	322	671	993	322	1,315
T43-R387	387	806	1,193	387	1,580
T43-R452	452	942	1,394	452	1,846
T43-R517	517	1,076	1,593	517	2,110
T46-R192	192	400	592	192	784
T46-R257	257	535	792	257	1,049
T46-R322	322	671	993	322	1,315
T46-R387	387	806	1,193	387	1,580
T46-R452	452	942	1,394	452	1,846
T46-R517	517	1,076	1,593	517	2,110

Nota: Elaboración propia

3.2.4.2 Costos operativos y de sostenimiento aplicados.

Tabla 12

OPEX por escenario (MUSD)

ESCENARIO	OPEX Satélite (MUSD)	OPEX Plataforma (MUSD)	OPEX Planta (MUSD)	SSTT Cost (M\$)	Social Agreement	Sustaining Relaves (MUSD)
T34-R192	2,593	179	1,075	88	92	320
T34-R257	3,471	239	1,439	118	92	428
T34-R322	4,349	299	1,803	148	92	537
T34-R387	5,226	360	2,167	178	92	645
T34-R452	6,104	420	2,531	208	92	753
T34-R517	6,978	481	2,894	238	92	861
T40-R192	2,593	179	1,075	88	92	320
T40-R257	3,471	239	1,439	118	92	428
T40-R322	4,349	299	1,803	148	92	537
T40-R387	5,226	360	2,167	178	92	645
T40-R452	6,104	420	2,531	208	92	753
T40-R517	6,978	481	2,894	238	92	861
T43-R192	2,593	179	1,075	88	92	320
T43-R257	3,471	239	1,439	118	92	428
T43-R322	4,349	299	1,803	148	92	537
T43-R387	5,226	360	2,167	178	92	645
T43-R452	6,104	420	2,531	208	92	753
T43-R517	6,978	481	2,894	238	92	861
T46-R192	2,593	179	1,075	88	92	320
T46-R257	3,471	239	1,439	118	92	428
T46-R322	4,349	299	1,803	148	92	537
T46-R387	5,226	360	2,167	178	92	645
T46-R452	6,104	420	2,531	208	92	753
T46-R517	6,978	481	2,894	238	92	861

Nota: Elaboración propia

3.2.4.3 Costos de inversión aplicados.

Tabla 13

Costos de inversión aplicados

ESCENARIO	Capex 3er Line (kUSD)	Growth Capital M\$ - Equipment Truck and Loader
T34-R192	-	80
T34-R257	-	80
T34-R322	-	80
T34-R387	-	80
T34-R452	-	80
T34-R517	-	80
T40-R192	500	53
T40-R257	500	80
T40-R322	500	80
T40-R387	500	80
T40-R452	500	80
T40-R517	500	80
T43-R192	500	53
T43-R257	500	106
T43-R322	500	106
T43-R387	500	106
T43-R452	500	80
T43-R517	500	106
T46-R192	500	53
T46-R257	500	106
T46-R322	500	106
T46-R387	500	106
T46-R452	500	106
T46-R517	500	106

Nota: Elaboración propia

3.2.4.4 Evaluación económica con CAPEX 500 MUSD. Para cada escenario T34–Ryyy y T46–Ryyy, el flujo de caja fue obtenido mediante el modelo financiero corporativo, incorporando:

- Valorización de cobre y subproductos,
- TC/RC, deducciones y penalidades,
- Impuesto a la renta y regalías,
- Depreciación acelerada,
- Costos de cierre.

Tabla 14

Evaluación económica con CAPEX 500 MUSD

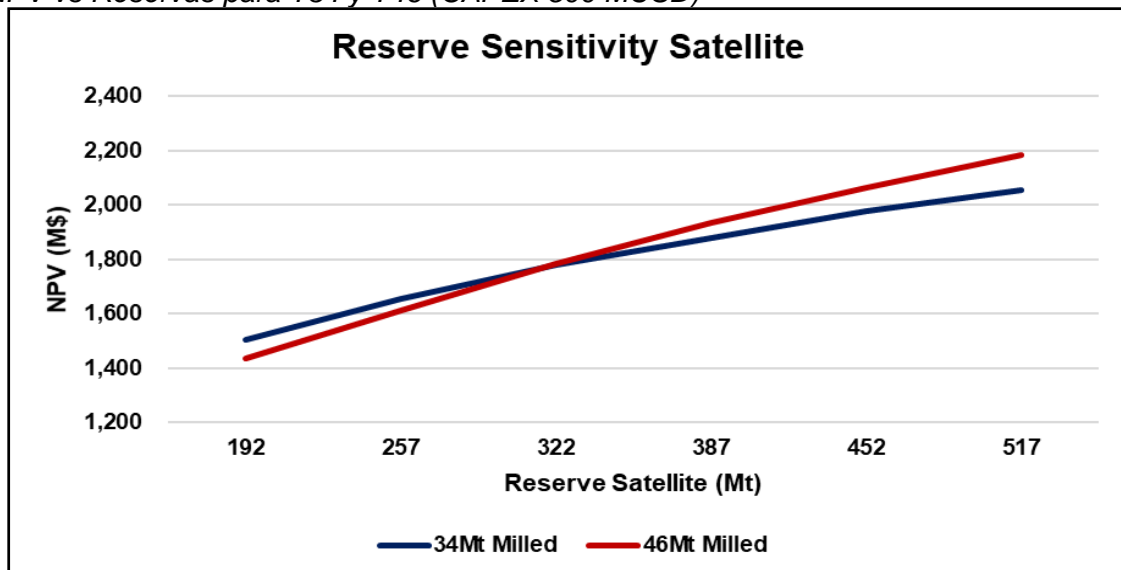
	Ryyy	NPV T34	NPV T46
	192	1,504	1,436
	257	1,652	1,613
	322	1,777	1,781
	387	1,879	1,932
	452	1,977	2,065
	517	2,055	2,183

Nota: Elaboración propia

3.2.4.5 Sensibilidad del NPV respecto a reservas. A continuación, se presentan los gráficos utilizados:

Figura 1

NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 500 MUSD)



Nota: Elaboración propia

3.2.5 Segunda etapa: Sensibilización del CAPEX (350–650 MUSD)

La segunda fase del análisis consistió en evaluar la robustez del resultado previo frente a variaciones del CAPEX. Aunque el monto de 500 MUSD constituye la mejor estimación de ingeniería, se evaluaron escenarios entre 350 MUSD y 650 MUSD, variando con ± 150 MUSD el CAPEX inicial.

Se procesaron nuevamente los NPVs para cada combinación T34–Ryyy y T46–Ryyy.

A continuación, se presentan las tablas completas.

Tabla 15

Evaluación económica con CAPEX 350 MUSD

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	1,504	1,501
257	1,652	1,677
322	1,777	1,846
387	1,879	1,996
452	1,977	2,129
517	2,055	2,247

Nota: Elaboración propia

Tabla 16

Evaluación económica con CAPEX 400 MUSD

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	1,504	1,478
257	1,652	1,655
322	1,777	1,823
387	1,879	1,974
452	1,977	2,107
517	2,055	2,225

Nota: Elaboración propia

Tabla 17*Evaluación económica con CAPEX 450 MUSD*

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	192	1,504
257	257	1,652
322	322	1,777
387	387	1,879
452	452	1,977
517	517	2,055

Nota: Elaboración propia**Tabla 18***Evaluación económica con CAPEX 550 MUSD*

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	1,504	1,415
257	1,652	1,592
322	1,777	1,760
387	1,879	1,911
452	1,977	2,044
517	2,055	2,162

Nota: Elaboración propia**Tabla 19***Evaluación económica con CAPEX 600 MUSD*

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	1,504	1,393
257	1,652	1,571
322	1,777	1,739
387	1,879	1,890
452	1,977	2,023
517	2,055	2,141

Nota: Elaboración propia

Tabla 20

Evaluación económica con CAPEX 650 MUSD

Ryyy	NPV T34	NPV T46
192	1,504	1,372
257	1,652	1,549
322	1,777	1,718
387	1,879	1,869
452	1,977	2,002
517	2,055	2,120

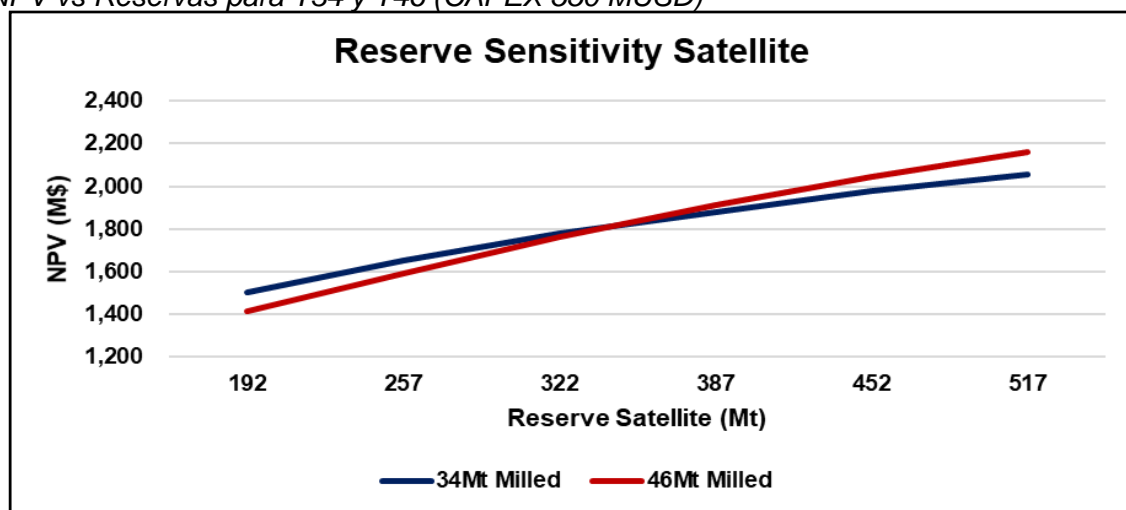
Nota: Elaboración propia

Si bien el modelo económico consideró la sensibilidad completa del CAPEX de expansión en un rango amplio (desde 350 hasta 650 MUSD), en proyectos de ampliación de plantas concentradoras es habitual que los costos finales superen las estimaciones conceptuales o de factibilidad, debido a contingencias operativas, ajustes en ingeniería de detalle, sobrecostos en contratos, variaciones de mercado y requerimientos adicionales en infraestructura auxiliar.

Por este motivo, resulta más relevante analizar con detalle los escenarios de CAPEX elevados, donde se pone a prueba la resiliencia económica del proyecto. Las siguientes figuras presentan la sensibilidad del NPV para los diferentes niveles de reservas satélite bajo estos CAPEX incrementados.

Figura 2

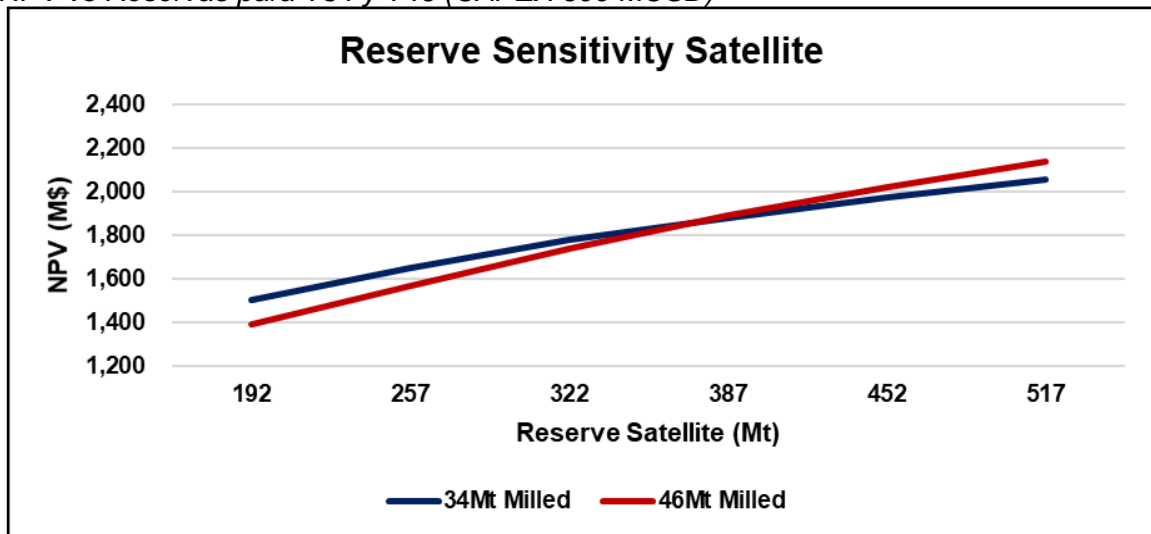
NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 550 MUSD)



Nota: Elaboración propia

Figura 3

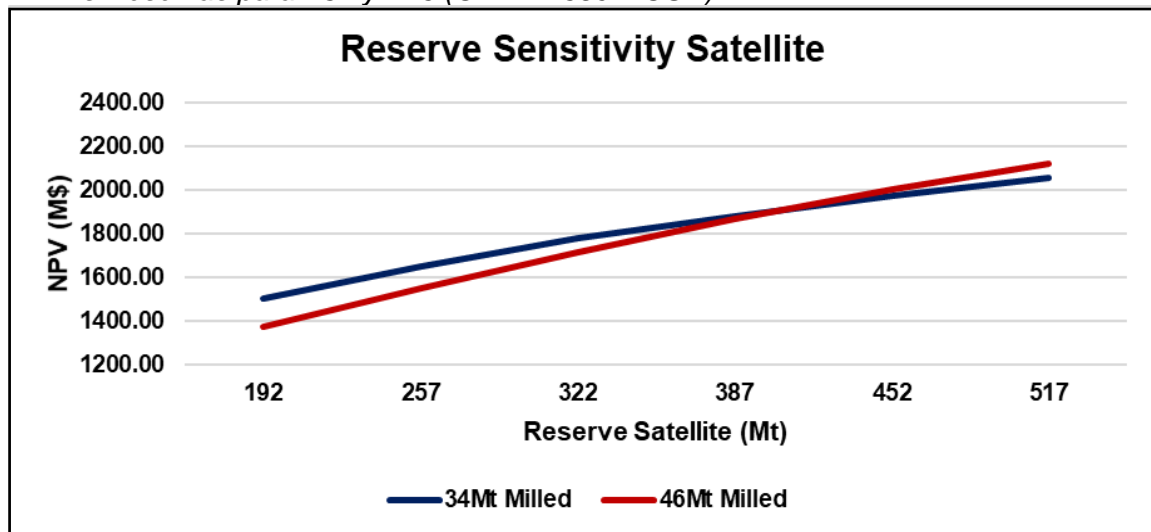
NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 600 MUSD)



Nota: Elaboración propia

Figura 4

NPV vs Reservas para T34 y T46 (CAPEX 650 MUSD)



Nota: Elaboración propia

Los gráficos muestran claramente que:

- Para 192 Mt y 257 Mt → T34 supera a T46.
- A partir de 322 Mt → T46 comienza a superar al caso base.
- Con 452 y 517 Mt → la brecha de valor aumenta sistemáticamente.

Los resultados confirman que:

- Si el CAPEX aumenta (550–650 MUSD), se requiere un inventario superior (≥ 387 Mt) para justificar la expansión.

- Con CAPEX moderado (350–450 MUSD), las reservas necesarias se reducen (257–322 Mt).
- En el CAPEX base de 500 MUSD, el umbral se ubica en 322 Mt.

Este comportamiento prueba que el proyecto es altamente sensible al CAPEX, y que la expansión solo debe ejecutarse si las reservas satélites están bien definidas

3.2.6 Tercera etapa: Sensibilización del precio del cobre

En la etapa final se evaluó la influencia del precio del cobre sobre el NPV incremental. Se analizaron los siguientes precios:

- 3.50 US\$/lb
- 3.75 US\$/lb
- 4.00 US\$/lb
- 4.25 US\$/lb (base)
- 4.50 US\$/lb
- 4.75 US\$/lb
- 5.00 US\$/lb

Los resultados muestran:

- A precios menores, el umbral mínimo de reservas aumenta significativamente.
- A precios mayores, la expansión es viable incluso con inventarios intermedios.

Este comportamiento es consistente con los modelos económicos de expansión en minería.

3.2.6.1 Construcción del Hill of Value (HOV). Con la matriz final de NPVs (throughput x reservas x precio), se construyeron las superficies tridimensionales HOV que permiten:

- Identificar zonas donde la expansión destruye valor,
- Identificar zonas donde la expansión es marginalmente viable,
- Determinar regiones donde throughput y reservas grandes maximizan el NPV,
- Visualizar la frontera económica de decisión.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Comparación económica entre casos base y escenarios de expansión

La primera parte del análisis consiste en comparar los resultados del NPV del caso base T34–Ryyy frente a los escenarios expandidos T46–Ryyy usando el CAPEX base de 500 MUSD.

4.1.1 Resultados económicos iniciales (CAPEX = 500 MUSD)

Bajo un price deck corporativo que fija el precio del cobre en 4.25 US\$/lb desde 2029 hasta el final del LOM, se obtuvieron los NPVs para los seis niveles de reservas modelados.

El comportamiento económico observado se resume de la siguiente manera:

- Para 192 Mt y 257 Mt de reservas, el NPV del caso base (T34) es superior al del escenario expandido (T46). En estos casos, el incremento del throughput no compensa el costo de inversión, lo que indica que la escala de reservas es insuficiente para sustentar la expansión.
- Para 322 Mt, los NPVs de ambos escenarios convergen y el escenario expandido T46 comienza a superar de forma marginal al caso base. Este punto marca el inicio del beneficio incremental asociado al aumento de capacidad.
- Para 387 Mt, 452 Mt y 517 Mt, el escenario expandido muestra una diferencia creciente a favor del NPV de T46, reflejando que a mayores inventarios de mineral, el throughput adicional captura una mayor porción de valor económico.

El análisis comparativo revela un hallazgo crucial para la toma de decisiones: El nivel mínimo de reservas satélite para justificar económicamente la expansión de capacidad a 46 Mt/año es de 322 Mt.

Este umbral constituye el punto de equilibrio en el cual el beneficio marginal generado por el aumento del throughput logra compensar el CAPEX de 500 MUSD. Por debajo de este nivel, el proyecto no alcanza la rentabilidad suficiente; por encima de él, la expansión pasa a generar incrementos progresivos en el valor económico de la operación.

4.2 Análisis de sensibilidad del NPV respecto al CAPEX

Dado que la estimación del CAPEX de expansión puede variar según el avance de ingeniería, se evaluaron escenarios entre 350 y 650 MUSD. Las matrices completas ya fueron presentadas en la sección 3.2, y aquí se discuten sus implicancias.

4.2.1 Evaluación cuantitativa del NPV para diferentes niveles de CAPEX

La Tabla 21 muestra el efecto directo que tienen las variaciones del CAPEX de expansión (entre 350 y 650 MUSD) sobre el NPV del proyecto, evaluado para los seis niveles de reservas satélite y permite identificar cómo la inversión de capital influye en el umbral mínimo de reservas necesarias para justificar económicamente la expansión.

Tabla 21

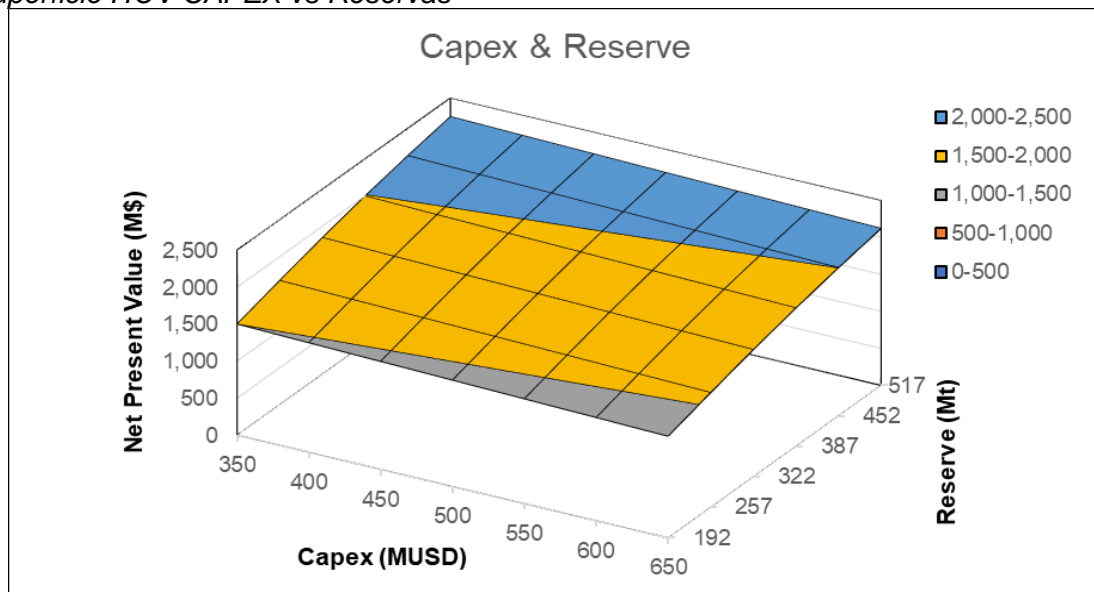
NPV según CAPEX y reservas (Throughput fijo)

		Capex (MUSD)						
		350	400	450	500	550	600	650
Reservas (Mt)	192	1,501	1,478	1,457	1,436	1,415	1,393	1,372
	257	1,677	1,655	1,634	1,613	1,592	1,571	1,549
	322	1,846	1,823	1,802	1,781	1,760	1,739	1,718
	387	1,996	1,974	1,953	1,932	1,911	1,890	1,869
	452	2,129	2,107	2,086	2,065	2,044	2,023	2,002
	517	2,247	2,225	2,204	2,183	2,162	2,141	2,120

Nota: Elaboración propia

Figura 5

Superficie HOV CAPEX vs Reservas



Nota: Elaboración propia

La Figura 5 evidencia el comportamiento descendente del NPV conforme aumenta el CAPEX, manteniendo constante el throughput. Al mismo tiempo, se observa que el incremento de reservas suaviza la caída del NPV, lo que confirma que la rentabilidad de la expansión depende simultáneamente de una inversión de capital eficiente y de un inventario robusto de mineral.

4.2.2 *Análisis descriptivo del comportamiento económico*

Los resultados muestran una tendencia clara y coherente con los principios de economía minera:

- CAPEX bajo (350–450 MUSD): La expansión se vuelve competitiva incluso con inventarios inferiores a 322 Mt.
- CAPEX de referencia (500 MUSD): La expansión solo se justifica si las reservas alcanzan al menos 322 Mt.
- CAPEX alto (550–650 MUSD): La expansión solo crea valor con inventarios muy altos, típicamente ≥ 387 Mt.

Esta sensibilidad confirma que el proyecto es altamente dependiente del costo de inversión. En minería, donde los equipos de proceso, sistemas de relaves, infraestructura y energía representan grandes desembolsos, esta tendencia es consistente con los criterios descritos por autores como Stermole (evaluación económica incremental) y Samis (economía de mina y planta).

4.3 Sensibilidad del precio del cobre

El price deck utilizado por la empresa coloca los precios de 2025–2029 de forma variable y un precio LOM de 4.25 US\$/lb desde 2030. Sin embargo, debido a que el precio del cobre es el driver principal del ingreso económico, se modelaron escenarios desde 3.50 US\$/lb hasta 5.00 US\$/lb.

4.3.1 *Sensibilidad combinada del NPV en función del Precio del Cobre y el Throughput (Reserva fija = 322 Mt)*

Una vez identificado que 322 Mt constituye la reserva mínima económica para justificar la expansión de procesamiento (sección 4.1), se realizó un análisis adicional cuyo

objetivo es evaluar cómo varía el NPV cuando se modifica simultáneamente el precio del cobre y la capacidad de planta, manteniendo fija dicha reserva en su umbral crítico.

Este ejercicio permite responder a una pregunta clave de gestión estratégica minera: “Dado que la operación cuenta con el inventario mínimo requerido (322 Mt), ¿en qué condiciones de precio del cobre se vuelve favorable incrementar el throughput?”

Para ello, se evaluaron siete escenarios de precio del cobre (3.50, 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 y 5.00 US\$/lb) y cuatro configuraciones de capacidad de planta (34, 37, 40 y 46 Mt/año).

Tabla 22

NPV según Precio del Cobre y Throughput (Reserva fija = 322 Mt)

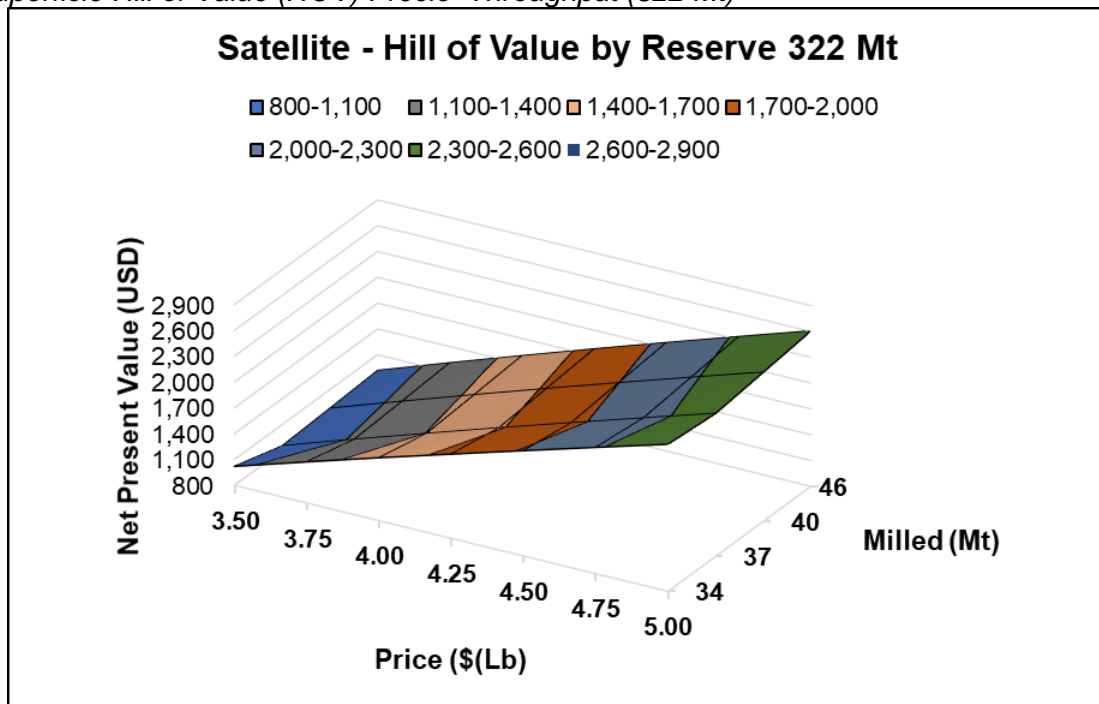
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Precio del Cobre (US\$/lb)	3.50	1,020	852	881	916
	3.75	1,277	1,132	1,169	1,210
	4.00	1,530	1,405	1,449	1,497
	4.25	1,777	1,675	1,727	1,781
	4.50	2,023	1,939	1,998	2,060
	4.75	2,266	2,200	2,266	2,334
	5.00	2,507	2,459	2,532	2,605

Nota: Elaboración propia

La Tabla 22 presenta el efecto combinado de las variaciones del precio del cobre (entre 3.50 y 5.00 US\$/lb) y los diferentes niveles de throughput (34, 37, 40 y 46 Mt/año) sobre el Valor Presente Neto del proyecto, manteniendo constante el inventario de reservas satélite en 322 Mt. Este análisis permite cuantificar cómo cada escenario operativo responde a condiciones de mercado más favorables o restrictivas, ofreciendo un marco comparativo que vincula directamente el precio del metal con la capacidad de procesamiento.

Figura 6

Superficie Hill of Value (HOV) Precio–Throughput (322 Mt)



Nota: Elaboración propia

La Figura 6 muestra la superficie Hill of Value (HOV) asociada a esta sensibilidad precio–throughput. En ella se aprecia la pendiente creciente del NPV conforme aumenta el precio del cobre, así como el efecto amplificador que genera un mayor throughput. La representación tridimensional permite visualizar que la creación de valor económico no depende únicamente del nivel de precios, sino de la interacción simultánea entre mercado, capacidad instalada y disponibilidad de reservas. La superficie resultante evidencia que la expansión de planta adquiere mayor relevancia conforme el precio del metal se incrementa, lo que refuerza su carácter de decisión estratégica fuertemente condicionada por las expectativas de mercado.

4.3.2 Comportamiento del NPV ante variaciones del precio

El análisis conjunto del NPV bajo los distintos escenarios de precio del cobre permite identificar tres patrones de comportamiento económico claramente diferenciados, los cuales reflejan la sensibilidad estructural del proyecto ante variaciones en las condiciones del mercado.

Escenarios de precios bajos (≤ 3.75 US\$/lb): insuficiencia económica para sostener la expansión.

En este rango, el valor generado por el throughput adicional no compensa el incremento del CAPEX ni el aumento de los costos operativos asociados a la expansión.

Ello se aprecia en que el NPV del escenario T46 (916 MUSD) se mantiene por debajo del obtenido para el caso base T34 (1,020 MUSD). Bajo condiciones de mercado deprimido, la rentabilidad marginal del procesamiento extra es insuficiente para justificar un incremento de capacidad.

En términos económicos, la operación se ubica en un tramo donde el retorno marginal del capital se encuentra por debajo de la tasa mínima requerida, lo que indica que una expansión de planta no sería financieramente recomendable.

Escenarios de precios intermedios (4.00–4.25 US\$/lb): zona de transición económica.

Cuando el cobre se ubica en niveles intermedios, la diferencia entre los NPVs de T34 y T46 se reduce considerablemente. Para un precio de 4.25 US\$/lb, el NPV de T46 supera apenas al del caso base (1,781 frente a 1,777 MUSD), lo cual revela que la expansión comienza a generar valor, aunque de manera marginal.

Este comportamiento corresponde a un intervalo donde la decisión de inversión está sujeta a alta sensibilidad frente a variaciones ligeras en los supuestos económicos (precio, costos, CAPEX, secuencia de procesamiento). La operación transita desde una zona de inviabilidad hacia un escenario donde la expansión podría considerarse, pero solo bajo supuestos estables y con riesgos controlados.

Escenarios de precios altos (≥ 4.50 US\$/lb): la expansión se convierte en la alternativa de mayor valor.

En condiciones de precios elevados, el incremento del throughput captura una proporción considerable del valor económico del yacimiento. Cuando el precio del cobre supera los 4.50 US\$/lb, el NPV asociado al escenario T46 crece de manera acelerada.

Para un precio de 5.00 US\$/lb, T46 alcanza 2,605 MUSD frente a los 2,507 MUSD del caso base.

Este comportamiento es consistente con los principios de economía minera: en mercados favorables, la infraestructura de mayor capacidad permite capitalizar más rápidamente el valor del recurso, potenciando el flujo de caja y adelantando producción. La expansión opera en este intervalo como un multiplicador de valor económico.

4.4 Análisis integrado mediante Hill of Value (HOV)

4.4.1 Estructura general de resultados

El análisis Hill of Value (HOV) permite visualizar la interacción conjunta entre:

- Throughput,
- Reservas,
- Costo de inversión,
- Precio del metal y su impacto en el NPV.

Se construyeron superficies tridimensionales NPV–Txx–Ryyy donde se aprecia:

- Zonas donde la expansión destruye valor (T46 con reservas bajas)
- Zonas donde la expansión es marginalmente competitiva (área alrededor de T46–R322)
- Zonas donde la expansión es óptima (T46 con reservas desde R387 en adelante)
- Regiones de inercia económica (escenarios T34–Ryyy donde se mantienen NPVs altos sin expansión)

4.4.2 Superficie HOV para precio de 3.50 US\$/lb

La Tabla 23 presenta el comportamiento del NPV para los 24 escenarios modelados bajo un precio fijo de 3.50 US\$/lb desde 2030 al LOM. Este escenario representa el límite inferior del análisis económico y permite evaluar la resiliencia de la expansión a condiciones de mercado adversas.

Tabla 23

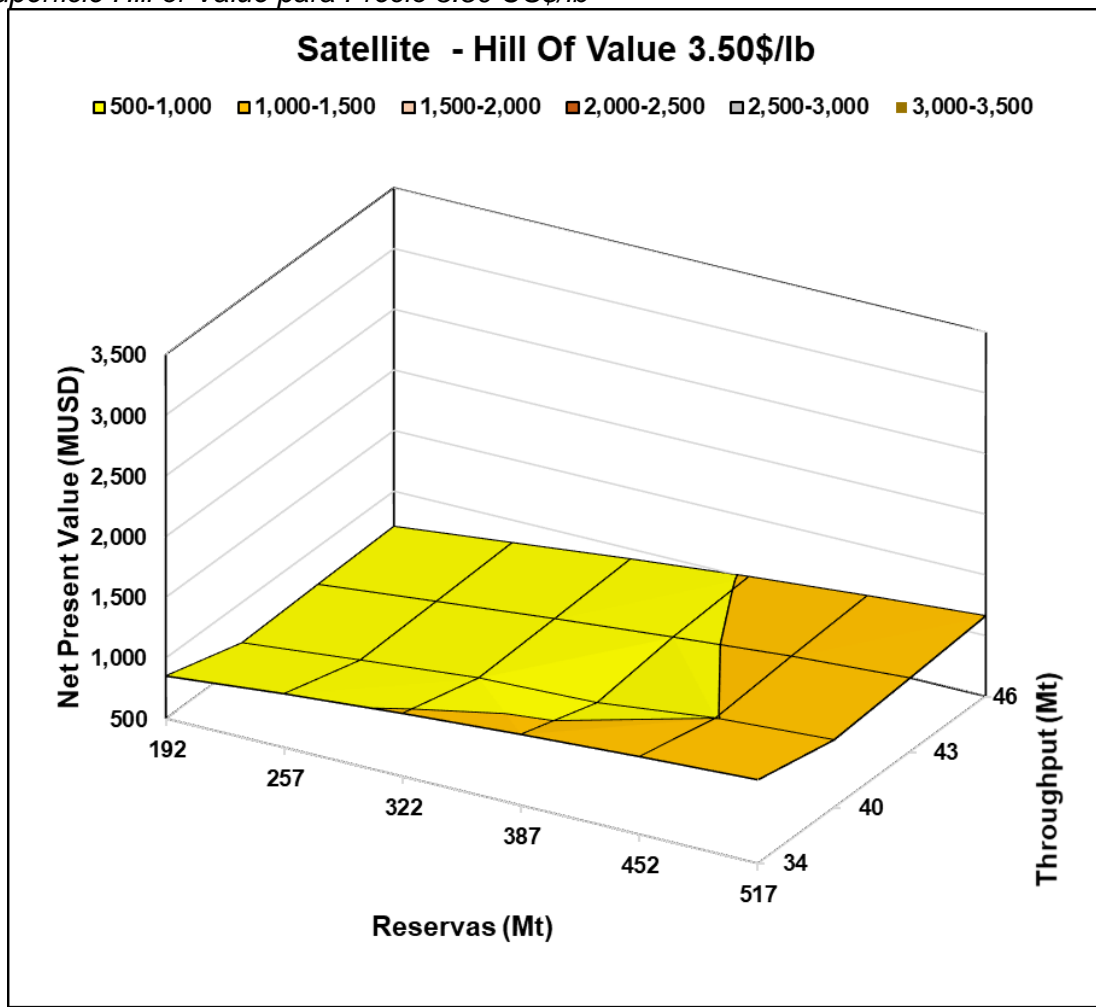
NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 3.50 US\$/lb)

		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	851	665	688	708
	257	943	760	786	812
	322	1,020	852	881	916
	387	1,085	886	968	1,009
	452	1,141	998	1,049	1,090
	517	1,188	1,057	1,108	1,162

Nota: Elaboración propia

Figura 7

Superficie Hill of Value para Precio 3.50 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

La Figura 7 evidencia que, bajo un precio deprimido de 3.50 US\$/lb, la expansión a 46 Mt/año solo genera NPVs marginales cuando las reservas superan los 452 Mt.

El caso T34–Ryyy domina en la mayor parte de la superficie, desplazando el umbral económico a niveles de inventario muy elevados.

Esto confirma que, en precios bajos, la expansión no es competitiva a menos que las reservas satélites alcancen magnitudes extraordinarias.

4.4.3 Superficie HOV para precio de 3.75 US\$/lb

La Tabla 24 resume los resultados del NPV obtenidos para los 24 escenarios cuando se adopta un precio constante de 3.75 US\$/lb a partir de 2030. Este nivel de precio continúa reflejando un contexto conservador, aunque menos restrictivo que el caso previo. El propósito de esta sensibilidad es analizar si una ligera recuperación del precio comienza a modificar el umbral mínimo de reservas requerido para considerar la expansión.

Tabla 24

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 3.75 US\$/lb)

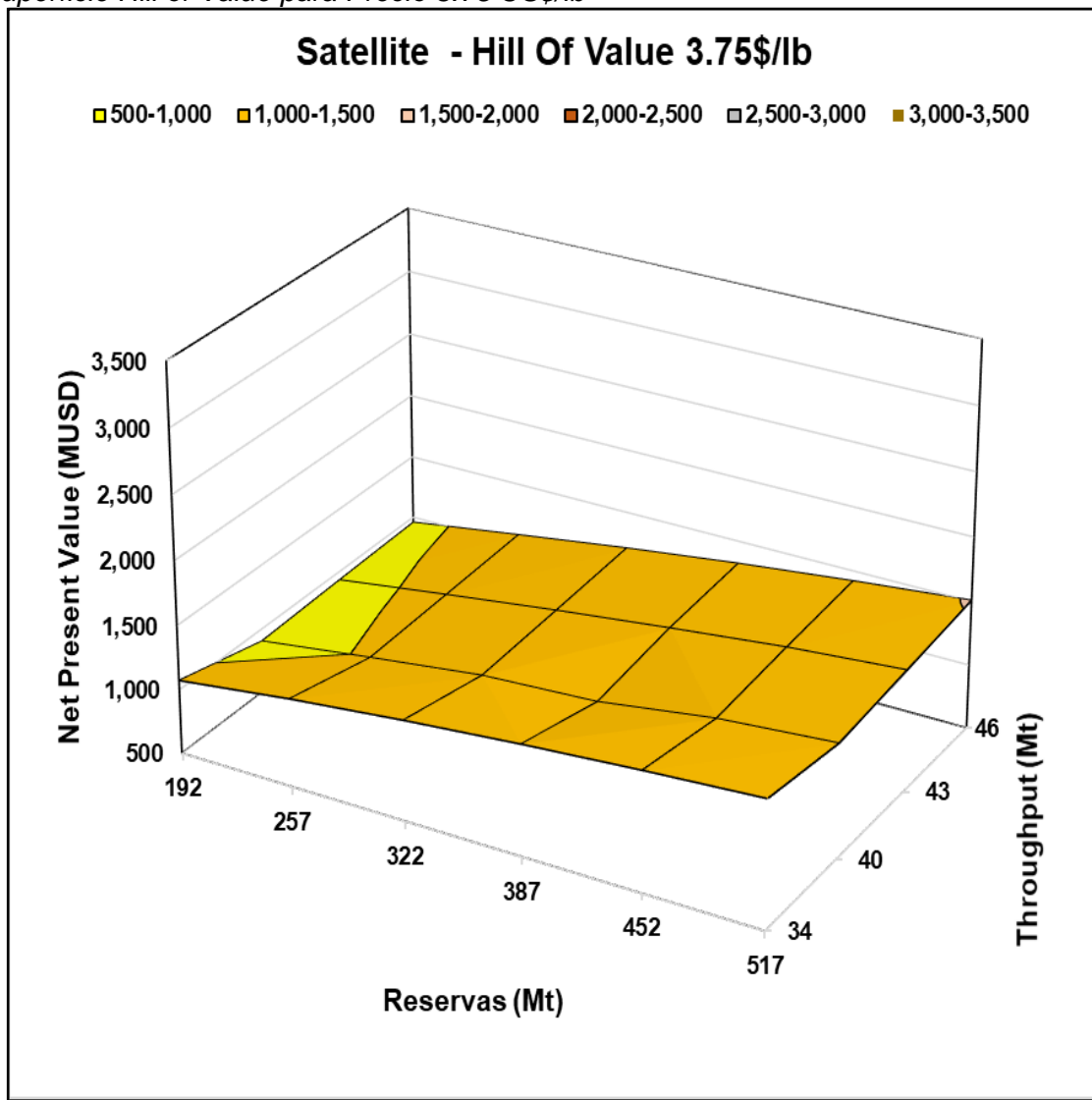
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	1,073	904	932	956
	257	1,184	1,021	1,053	1,084
	322	1,277	1,132	1,169	1,210
	387	1,356	1,181	1,273	1,322
	452	1,424	1,310	1,370	1,421
	517	1,482	1,382	1,444	1,508

Nota: Elaboración propia

La figura correspondiente permite visualizar la progresión del NPV a través de la superficie HOV. Los cambios en la pendiente y en el comportamiento volumétrico permiten evaluar cómo se redistribuye el valor cuando el mercado presenta señales moderadas de recuperación.

Figura 8

Superficie Hill of Value para Precio 3.75 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.4.4 Superficie HOV para precio de 4.00 US\$/lb

La Tabla 25 recoge los resultados obtenidos al utilizar un precio de 4.00 US\$/lb, considerado un escenario de mercado equilibrado. Esta sensibilidad permite cuantificar el punto en el cual los ingresos comienzan a compensar de manera más directa los costos de capital de la expansión, evaluando si la operación entra en una zona económicamente neutral o ligeramente favorable.

Tabla 25

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.00 US\$/lb)

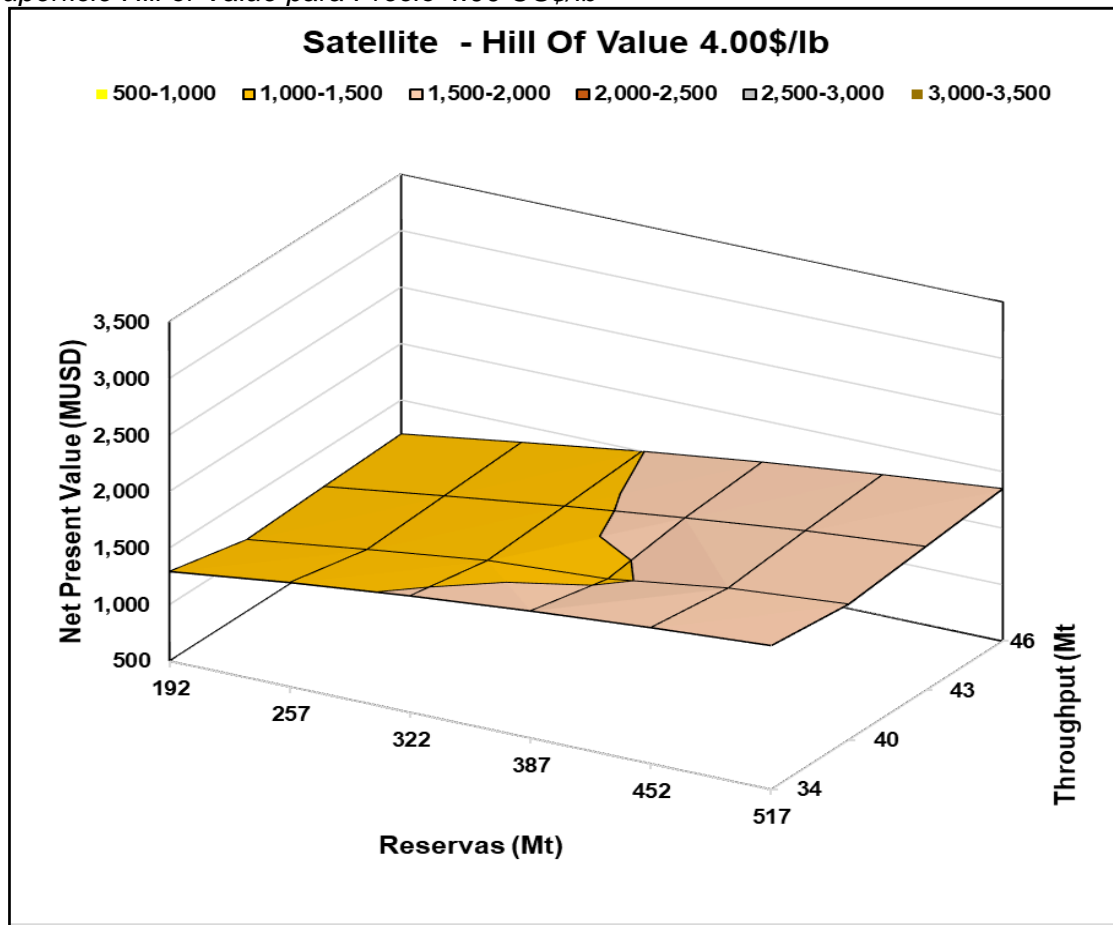
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	1,292	1,136	1,169	1,198
	257	1,421	1,275	1,313	1,350
	322	1,530	1,405	1,449	1,497
	387	1,624	1,469	1,572	1,629
	452	1,703	1,615	1,685	1,745
	517	1,772	1,700	1,773	1,848

Nota: Elaboración propia

La superficie obtenida muestra una pendiente más pronunciada que en los escenarios previos, especialmente hacia los niveles de mayor throughput. Esto permite identificar cómo el comportamiento económico comienza a cambiar con mayor claridad cuando los ingresos asociados al metal superan los costes marginales de operación.

Figura 9

Superficie Hill of Value para Precio 4.00 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.4.5 Superficie HOV para precio de 4.25 US\$/lb (Caso Base)

La Tabla 26 presenta los valores del NPV para un precio de 4.25 US\$/lb, que corresponde al caso oficial y base del estudio.

Este escenario constituye el punto de referencia principal para evaluar la decisión de expansión, ya que refleja las expectativas internas de la organización respecto a los precios del metal en el largo plazo.

Tabla 26

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.25 US\$/lb)

		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	1,504	1,366	1,403	1,436
	257	1,652	1,527	1,570	1,613
	322	1,777	1,675	1,727	1,781
	387	1,885	1,753	1,867	1,932
	452	1,977	1,916	1,997	2,065
	517	2,055	2,014	2,099	2,183

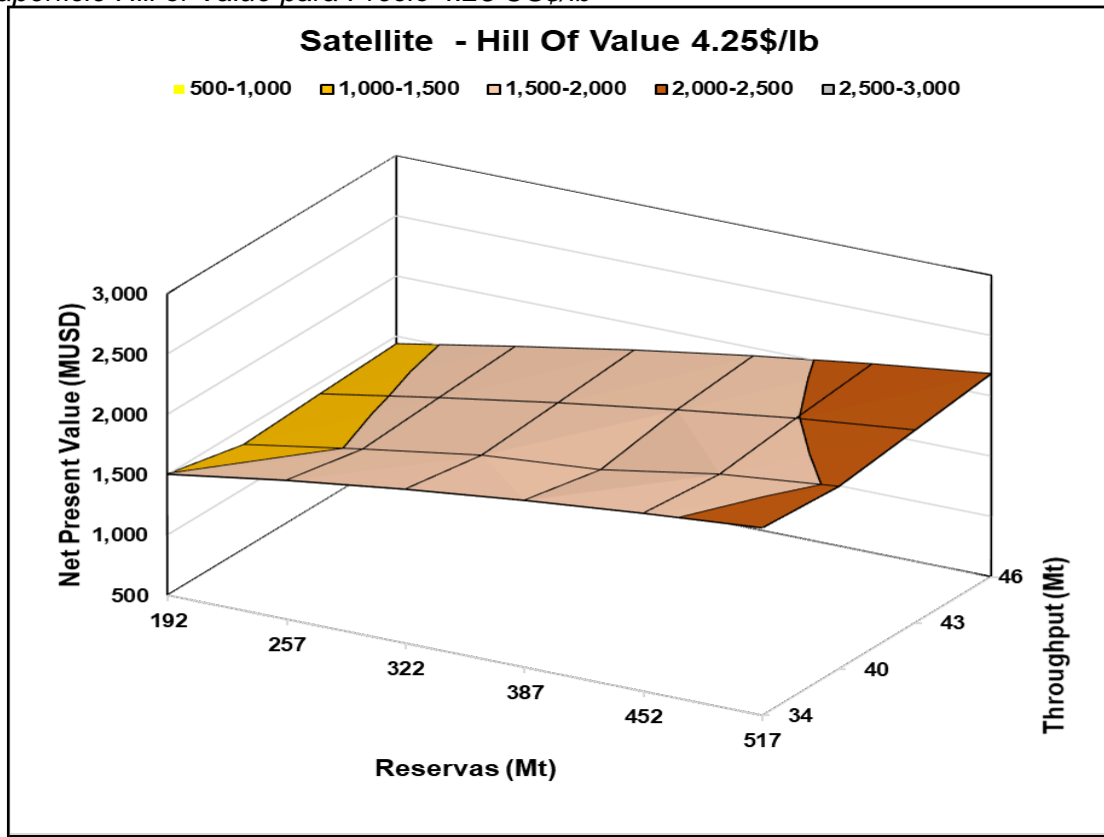
Nota: Elaboración propia

La figura asociada permite visualizar con claridad la convergencia entre los distintos niveles de throughput y el comportamiento ascendente del NPV a medida que se incrementa el inventario de reservas.

La superficie exhibe una geometría más favorable comparada con los casos previos.

Figura 10

Superficie Hill of Value para Precio 4.25 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.4.6 Superficie HOV para precio de 4.50 US\$/lb

La Tabla 27 muestra el comportamiento del NPV al considerar un precio de 4.50 US\$/lb, correspondiente a un periodo prolongado de bonanza en el mercado del cobre. Este nivel permite evaluar la capacidad de expansión para capturar valor adicional bajo un entorno altamente favorable.

Tabla 27

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.50 US\$/lb)

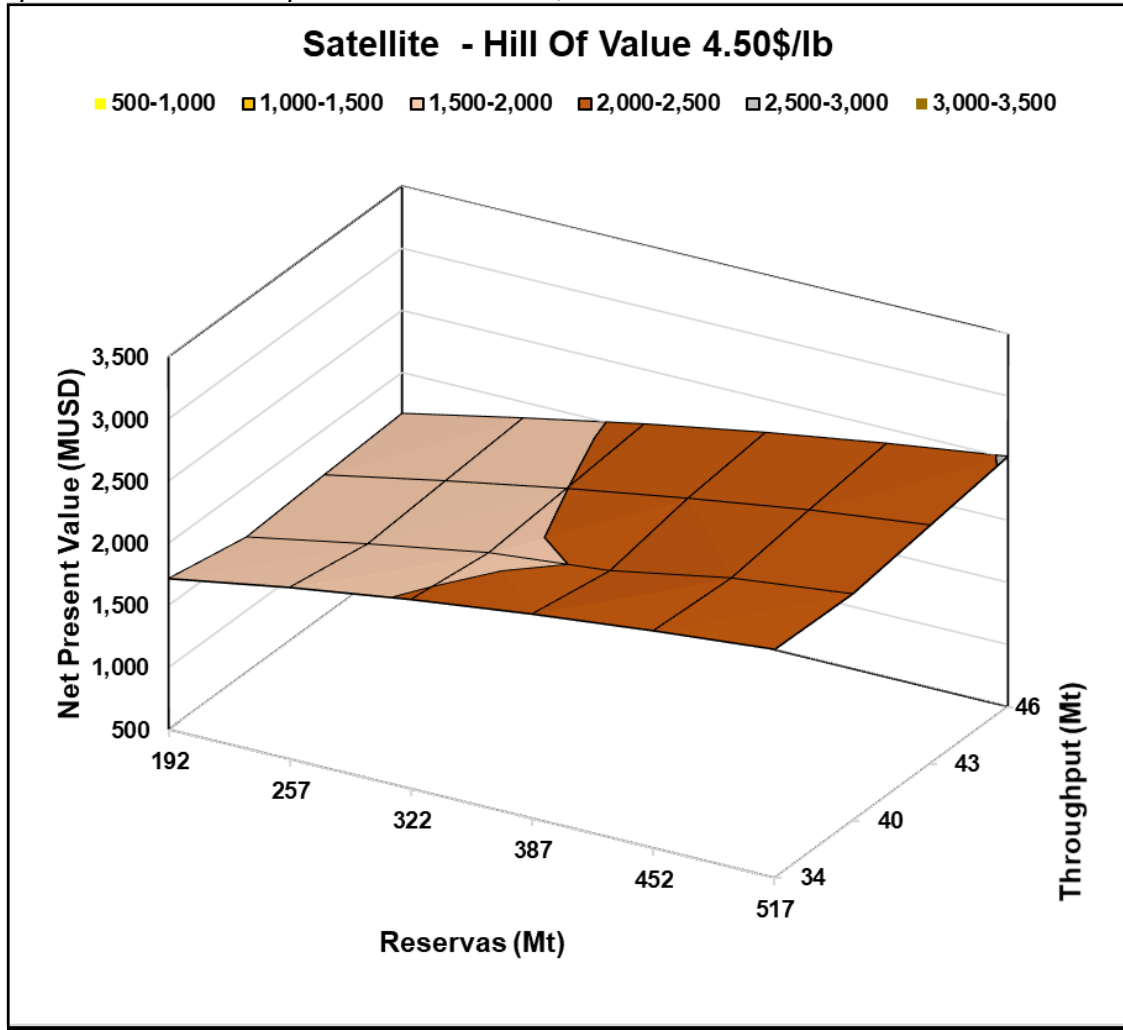
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	1,714	1,589	1,631	1,669
	257	1,881	1,772	1,821	1,870
	322	2,023	1,939	1,998	2,060
	387	2,144	2,032	2,157	2,230
	452	2,248	2,211	2,302	2,379
	517	2,336	2,323	2,418	2,513

Nota: Elaboración propia

La superficie HOV generada exhibe pendientes considerablemente mayores y un desplazamiento ascendente en toda la matriz de escenarios, reflejando el impacto fuertemente positivo del precio sobre el valor económico.

Figura 11

Superficie Hill of Value para Precio 4.50 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.4.7 Superficie HOV para precio de 4.75 US\$/lb

La Tabla 28 recoge los resultados del NPV para un precio de 4.75 US\$/lb, representativo de un ciclo alcista excepcional. Este escenario se utiliza para medir el grado de apalancamiento operativo del proyecto frente a condiciones extraordinariamente ventajosas.

Tabla 28

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 4.75 US\$/lb)

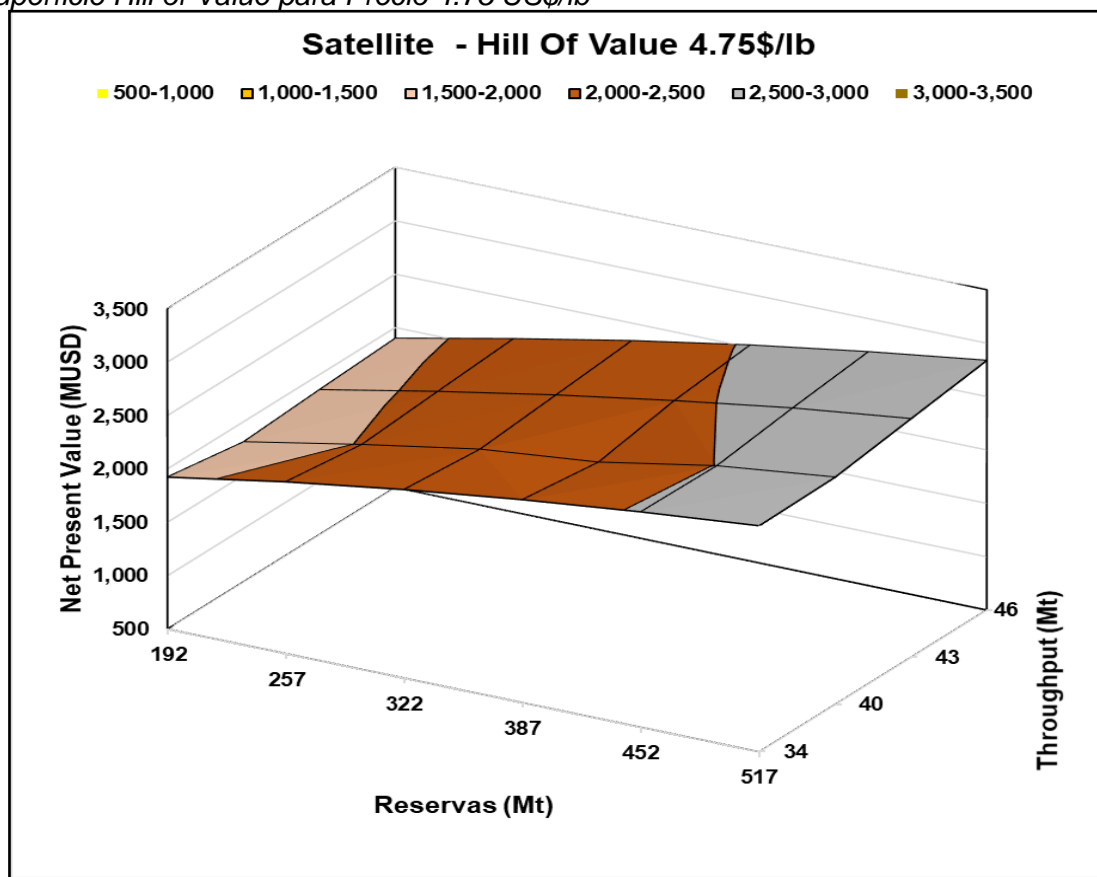
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	1,923	1,810	1,857	1,898
	257	2,109	2,014	2,070	2,123
	322	2,266	2,200	2,266	2,334
	387	2,401	2,308	2,443	2,523
	452	2,516	2,504	2,604	2,689
	517	2,615	2,628	2,734	2,838

Nota: Elaboración propia

La superficie asociada muestra incrementos significativos del NPV, así como un patrón claramente convexo hacia el throughput máximo, indicando que el valor marginal del procesamiento adicional crece exponencialmente en mercados alcistas.

Figura 12

Superficie Hill of Value para Precio 4.75 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.4.8 Superficie HOV para precio de 5.00 US\$/lb

La Tabla 29 sintetiza los resultados del escenario de 5.00 US\$/lb, el límite superior del análisis. Este caso permite medir la respuesta del proyecto bajo condiciones excepcionales de rentabilidad en el mercado del cobre.

Tabla 29

NPV según Throughput y Reservas (Precio Cu = 5.00 US\$/lb)

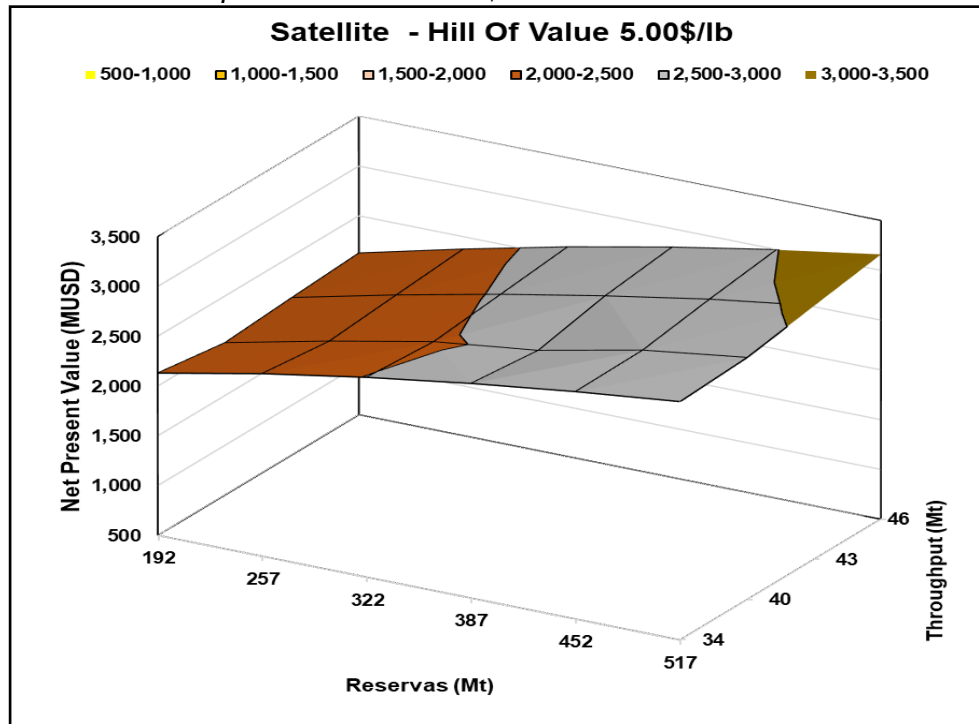
		Throughput (Mt)			
		34	40	43	46
Reservas (Mt)	192	2,130	2,030	2,080	2,124
	257	2,334	2,255	2,316	2,373
	322	2,507	2,459	2,532	2,605
	387	2,656	2,582	2,726	2,813
	452	2,783	2,794	2,903	2,997
	517	2,893	2,931	3,047	3,160

Nota: Elaboración propia

La figura HOV evidencia máximos pronunciados en términos de NPV en todos los niveles de reservas y throughput, ofreciendo una representación tridimensional del potencial económico del proyecto bajo el entorno más favorable evaluado.

Figura 13

Superficie Hill of Value para Precio 5.00 US\$/lb



Nota: Elaboración propia

4.5 Prueba de hipótesis

Para validar estadísticamente los resultados obtenidos en la evaluación económica, se plantearon la hipótesis nula y la hipótesis alternativa conforme a los objetivos del estudio:

H₀ (Hipótesis nula):

El incremento del throughput y la integración de nuevas reservas satélite no generan un Valor Presente Neto (NPV) significativamente superior al del caso base.

H₁ (Hipótesis alternativa):

El incremento del throughput y la integración de nuevas reservas satélite sí generan un Valor Presente Neto (NPV) significativamente superior al del caso base.

Con el propósito de validar estadísticamente si el incremento de capacidad de planta (de 34 a 46 Mt/año) genera un valor económico superior, se aplicó una prueba t pareada basada en las diferencias de NPV obtenidas en los 42 escenarios evaluados, los cuales combinan distintas sensibilidades de reservas y variaciones del CAPEX.

Para cada uno de los 42 escenarios se calculó:

$$\Delta NPV = NPV_{T46} - NPV_{T34}$$

Estos valores constituyeron la base de datos para la prueba de hipótesis y para el histograma de distribución de diferencias.

Los resultados obtenidos en Minitab se muestran en la Tabla 54.

Tabla 30

Estadísticos descriptivos para NPV_T46 y NPV_T34

MUESTRA	N	Media (MUSD)	Desv. Est.	Error Est. de la media
NPV_T46_1	42	1835.1	263.2	40.6
NPV_T34_1	42	1807.3	190.4	29.4

Nota: Elaboración propia

La diferencia promedio observada es:

$$\bar{\Delta} = 27.8 \text{ MUSD}$$

Los resultados de la prueba estadística se presentan en la Tabla siguiente:

Tabla 31*Resultados de la prueba t pareada*

PARÁMETRO	RESULTADO
Media de las diferencias	27.8 MUSD
Desv. Est.	81.9
Error estándar	12.6
Límite inferior del IC 95%	6.5
Valor t	2.20
p-value	0.017

Nota: Elaboración propia

El valor p obtenido:

$$p = 0.017 < 0.05$$

indica que la diferencia entre los NPVs de ambos escenarios es estadísticamente significativa al 95% de confianza.

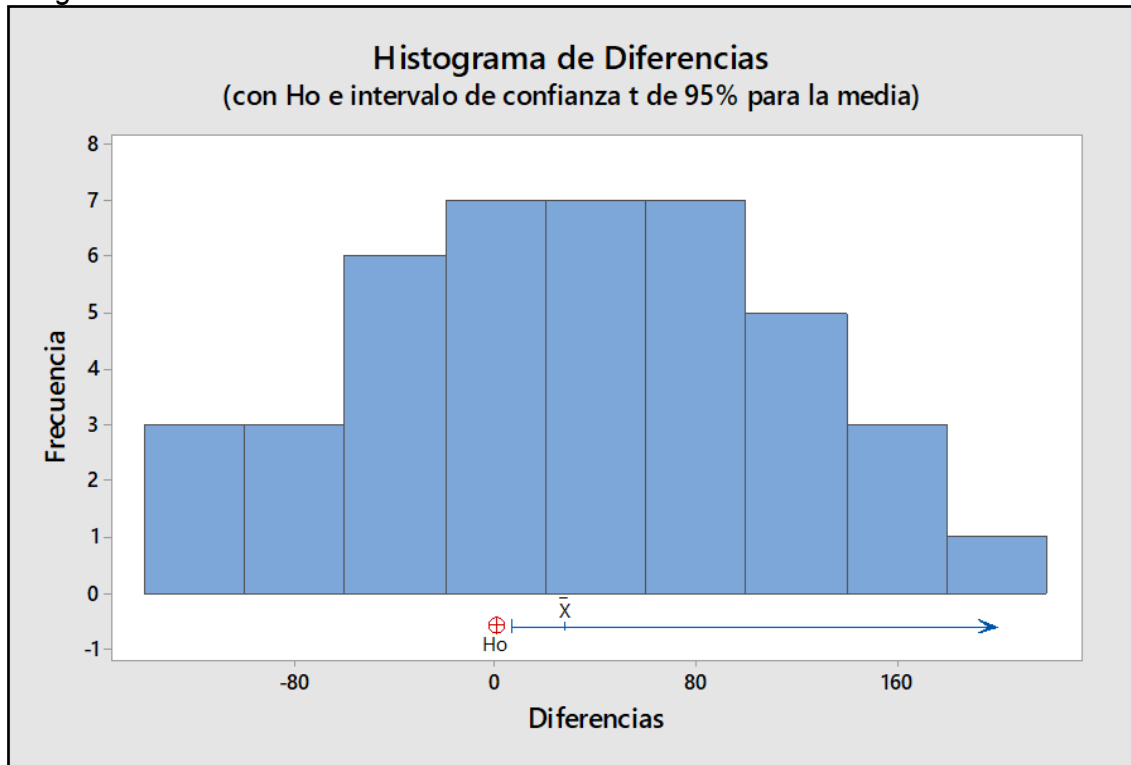
El límite inferior del intervalo de confianza de la diferencia media (6.5 MUSD) es positivo, lo que refuerza la evidencia estadística a favor de la alternativa.

Esto implica que, de manera sistemática y considerando la variabilidad de precios, CAPEX y reservas evaluadas, el throughput de 46 Mt/año tiende a generar mayor valor económico que el escenario base de 34 Mt/año.

El histograma evidencia una distribución aproximadamente simétrica con predominancia de valores positivos, lo cual es coherente con el resultado de la prueba t. La mayoría de los escenarios evaluados presentan un NPV mayor en T46, mientras que solo un subconjunto menor genera diferencias negativas.

Figura 14

Histograma de diferencias Δ NPV



Nota: Elaboración propia

El análisis confirma que:

- Las diferencias promedio de NPV favorecen al caso expandido.
- La magnitud de la diferencia, aunque moderada (≈ 28 MUSD), es consistente.
- La evidencia es suficiente para rechazar H_0 y validar la afirmación de que la expansión a 46 Mt/año aporta mayor valor económico, bajo la lógica multiescenario empleada en esta tesis.

Esta validación estadística complementa el análisis determinístico y de superficies HOV, proporcionando respaldo cuantitativo adicional a la conveniencia económica de la expansión cuando se integran múltiples condiciones operativas.

Conclusiones

El análisis integral de los 24 escenarios Txx–Ryyy permitió determinar que la expansión de la capacidad de planta desde 34 Mt/año hasta 46 Mt/año solo se justifica económicamente cuando el yacimiento satélite aporta un inventario mínimo de 322 Mt, nivel que compensa adecuadamente el CAPEX base de 500 MUSD. Reservas menores no generan valor incremental frente al caso base, aun con mayor throughput.

La sensibilidad al CAPEX mostró que incrementos en la inversión reducen significativamente el NPV incremental, desplazando el umbral de reservas hacia valores superiores. Esto confirma que la viabilidad de la expansión depende de una adecuada contención de costos y de una estimación realista del capital requerido.

Por otro lado, el análisis de precios indicó que la conveniencia de la expansión es altamente dependiente del mercado del cobre: a precios iguales o inferiores a 3.75 US\$/lb la expansión no es favorable, mientras que con precios desde 4.50 US\$/lb la alternativa expandida genera beneficios crecientes y sostenidos.

La integración de los perfiles anuales de producción confirmó que la operación combinada entre la mina principal y el yacimiento satélite puede sostener los niveles de molienda modelados, extendiendo la vida útil del proyecto y garantizando un flujo de mineral continuo y consistente en los escenarios de mayor inventario.

Finalmente, la prueba estadística realizada mediante un análisis T pareado permitió validar cuantitativamente que el NPV del caso expandido T46 es superior al del caso base T34. Con un valor $p = 0.017 (< 0.05)$, se rechaza la hipótesis nula y se confirma que, bajo las combinaciones de precio, reservas y costos analizados, la expansión de planta constituye una alternativa económicamente superior. Esta evidencia fortalece la robustez de las conclusiones técnicas y respalda la aplicación de metodologías de análisis integradas como el enfoque Hill of Value.

Recomendaciones

Se recomienda reforzar las campañas de perforación orientadas a convertir recursos en reservas económicamente viables, priorizando alcanzar el inventario mínimo de 322 Mt que sustenta la decisión de expansión de planta.

Es fundamental avanzar hacia ingeniería de mayor detalle para reducir la incertidumbre del CAPEX y evitar desviaciones que puedan comprometer la rentabilidad del proyecto. Se sugiere complementar este proceso con análisis probabilísticos de riesgo.

Asimismo, se propone establecer umbrales de precio del cobre para la toma de decisiones estratégicas: valores superiores a 4.50 US\$/lb favorecen la expansión, mientras que precios inferiores justifican mantener la operación en 34 Mt/año.

Se recomienda estandarizar el enfoque Hill of Value (HOV) como herramienta de planificación para evaluar de manera integrada throughput, reservas y variaciones del mercado, asegurando decisiones de inversión más robustas.

Finalmente, se sugiere considerar alternativas de expansión intermedias (40–43 Mt/año), que presentan menor riesgo económico y podrían constituir opciones más equilibradas en escenarios de incertidumbre geológica o de mercado.

Finalmente, evaluar alternativas intermedias de expansión (40–43 Mt/año) como opciones estratégicas que permiten equilibrar inversión y beneficio, especialmente en escenarios donde las reservas o los precios presentan mayor incertidumbre. Estas alternativas ofrecen una vía gradual de crecimiento con menor exposición al riesgo económico.

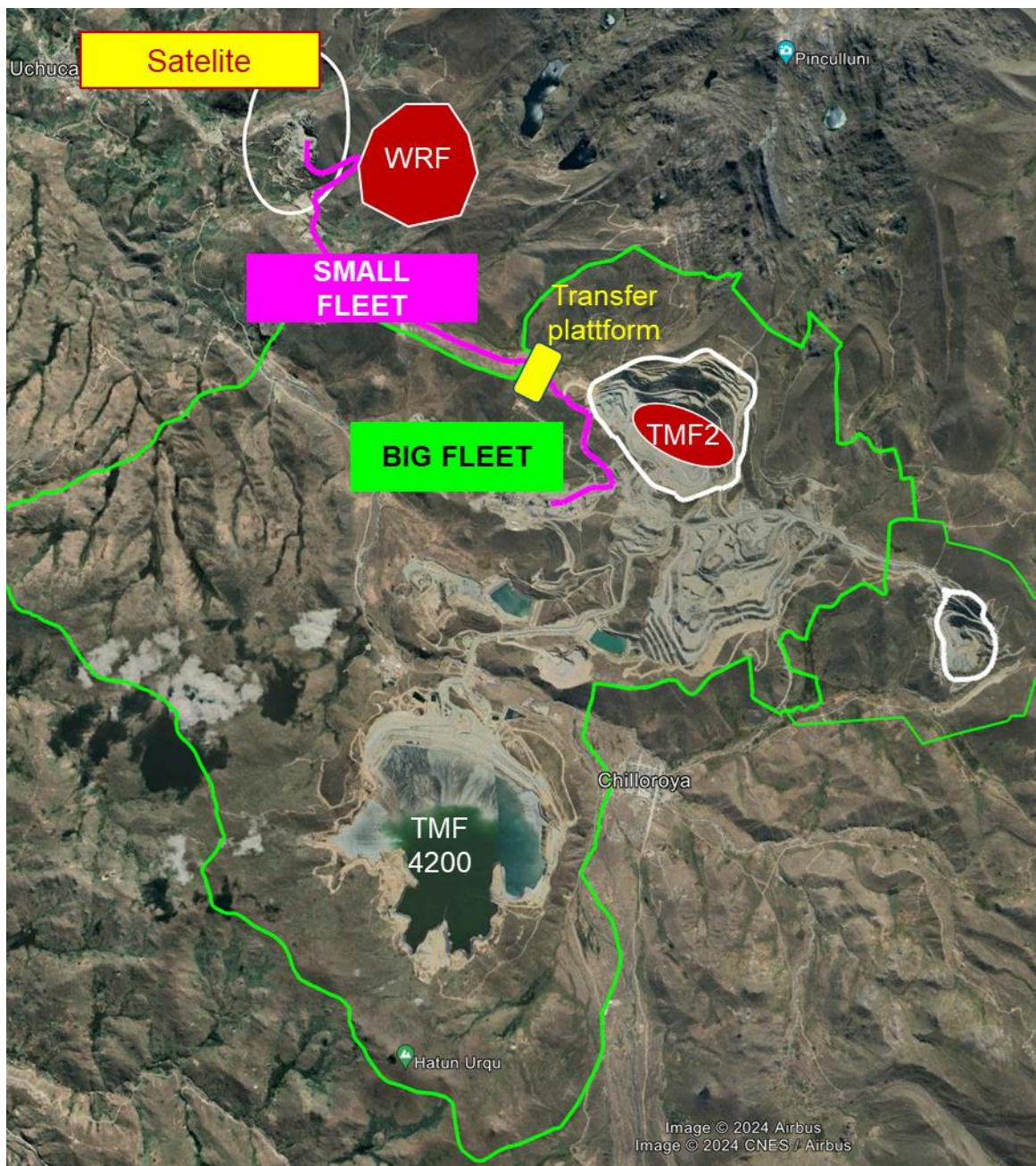
Referencias bibliográficas

- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of Corporate Finance*. McGraw-Hill Education.
- Clemen, R.T., & Reilly, T. (última edición disponible). *Making Hard Decisions with DecisionTools*.
- Hartman, H.L. (última edición disponible). *SME Mining Engineering Handbook*.
- NI 43-101 *Technical Reports (para proyectos listados en bolsas canadienses) o JORC Code reports (para proyectos australianos)*.
- Otto, J. (2006). *Mining Economics and Financial Modelling*. John Wiley & Sons.
- Peters, W.C. (última edición disponible). *Exploration and Mining Geology*.
- Rudolph, R.E. (última edición disponible). *Valuation of Mineral Projects*.
- Samis, M. (2011). *Mine and Mill Project Economics: An Introduction*. Samis & Associates Inc.
- Smith, D. G. (2018). *Strategic Financial Management*. Routledge.
- Stermole, F.J., & Stermole, J.M. (última edición disponible). *Economic Evaluation and Investment Decision Methods*.
- Wellmer, F. W., & Dalheimer, M. (2019). *Economic Evaluations in Exploration*. Springer.

Anexos

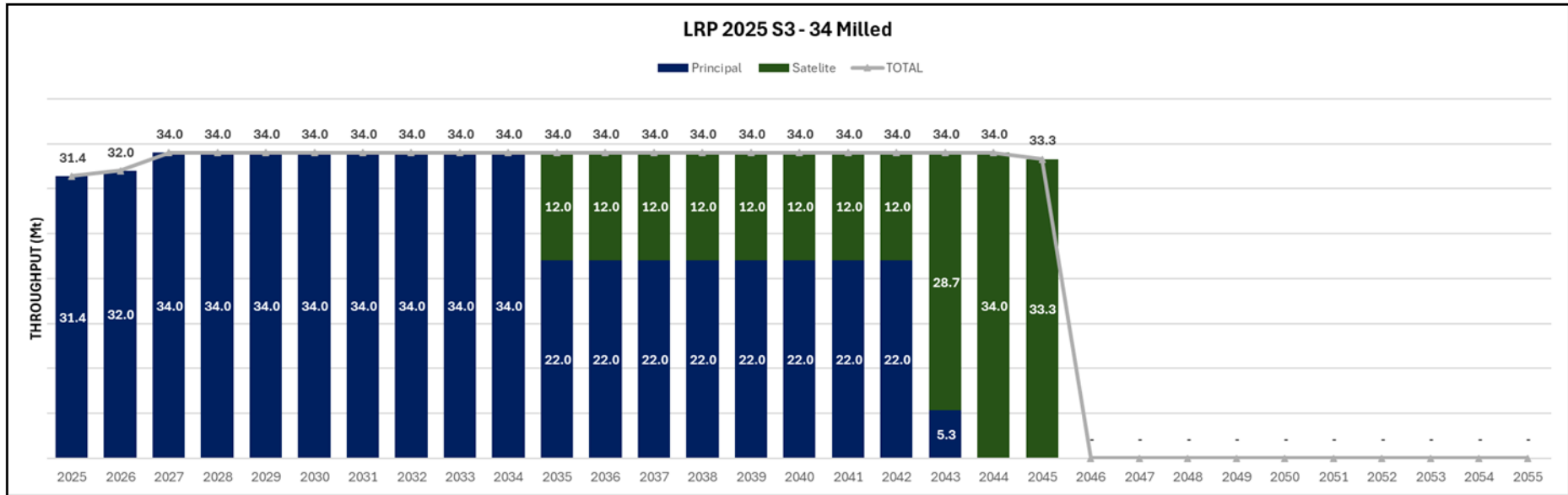
	Pág.
Anexo 1: Ubicación referencial del proyecto y componentes principales activas.....	1
Anexo 2: Perfiles completos de producción para los 24 escenarios	2

Anexo 1: Ubicación referencial del proyecto y componentes principales activas



Anexo 2: Perfiles completos de producción para los 24 escenarios

Perfil de producción anual del escenario T34–R192



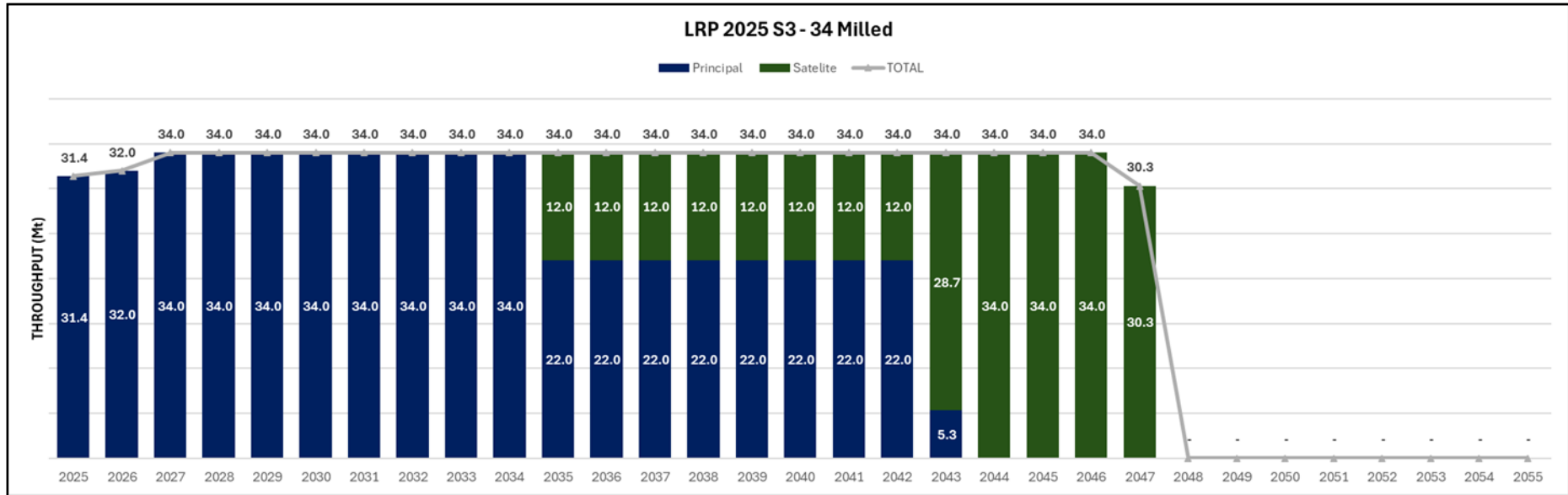
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R192

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	33
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R257



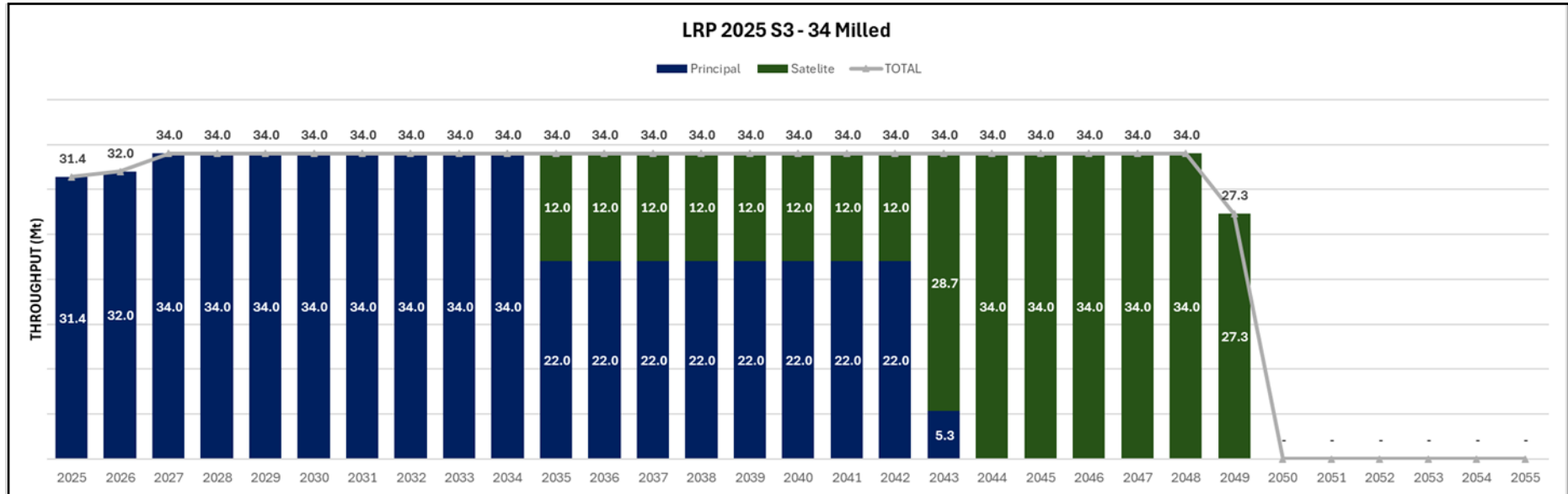
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R257

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5				
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	34	34	30
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	30

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R322



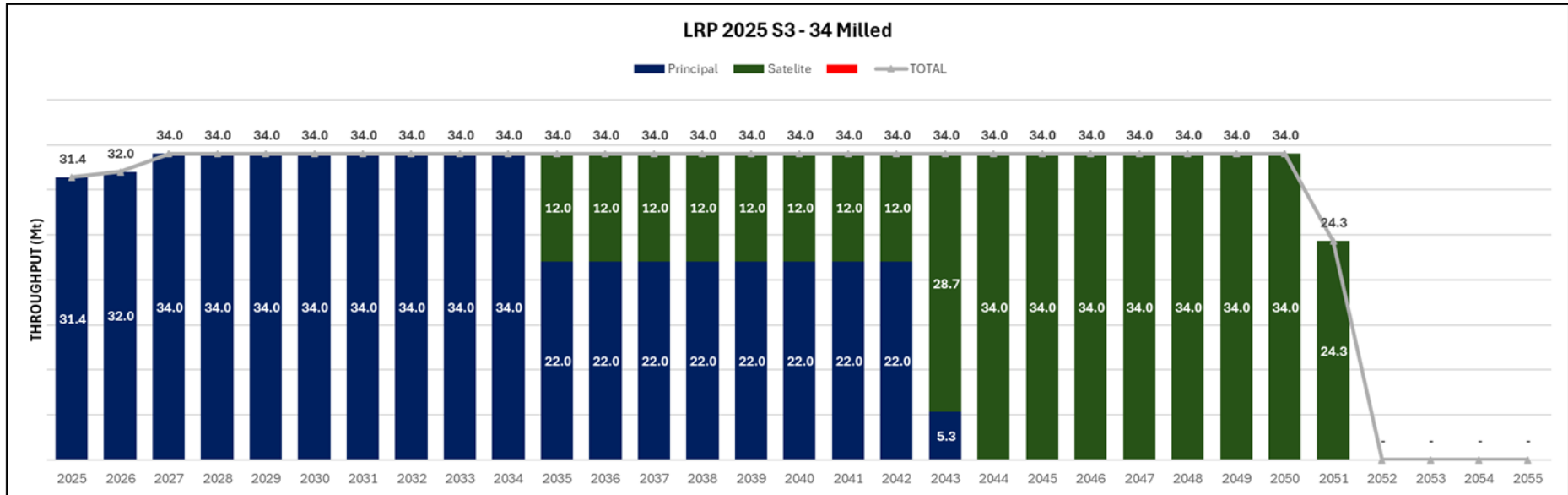
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R322

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5						
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	34	34	34	34	27
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	27

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R387



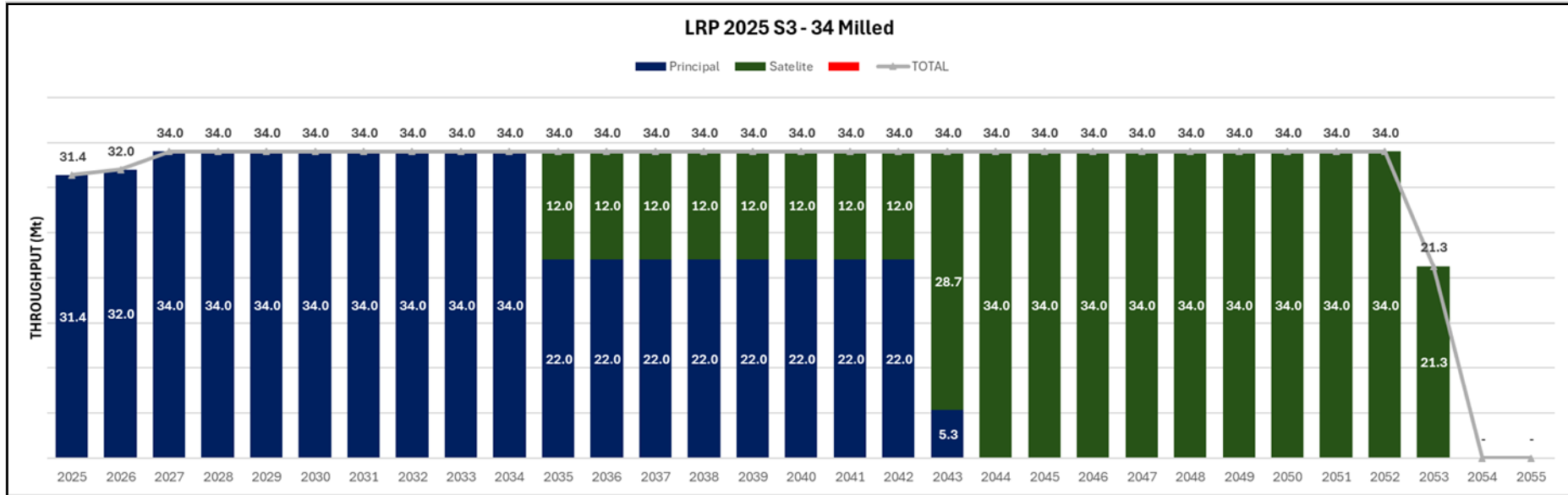
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R387

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 - 2050	2051
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	24
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	24

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34-R452



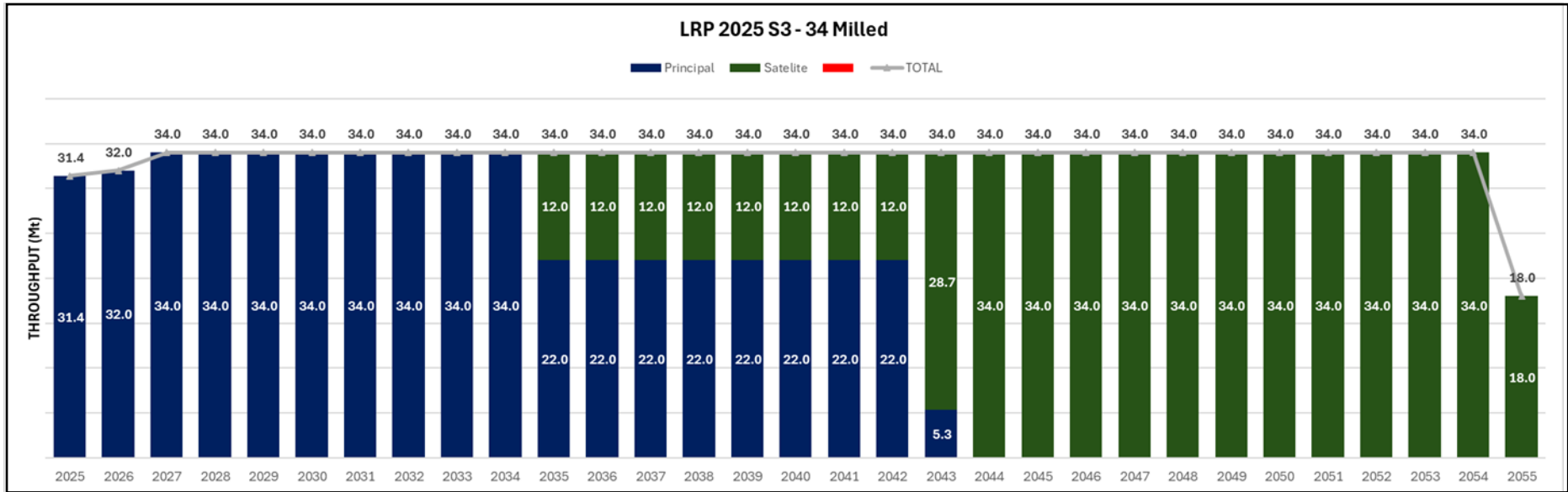
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34-R452

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2052	2053
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	21
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	21

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R517



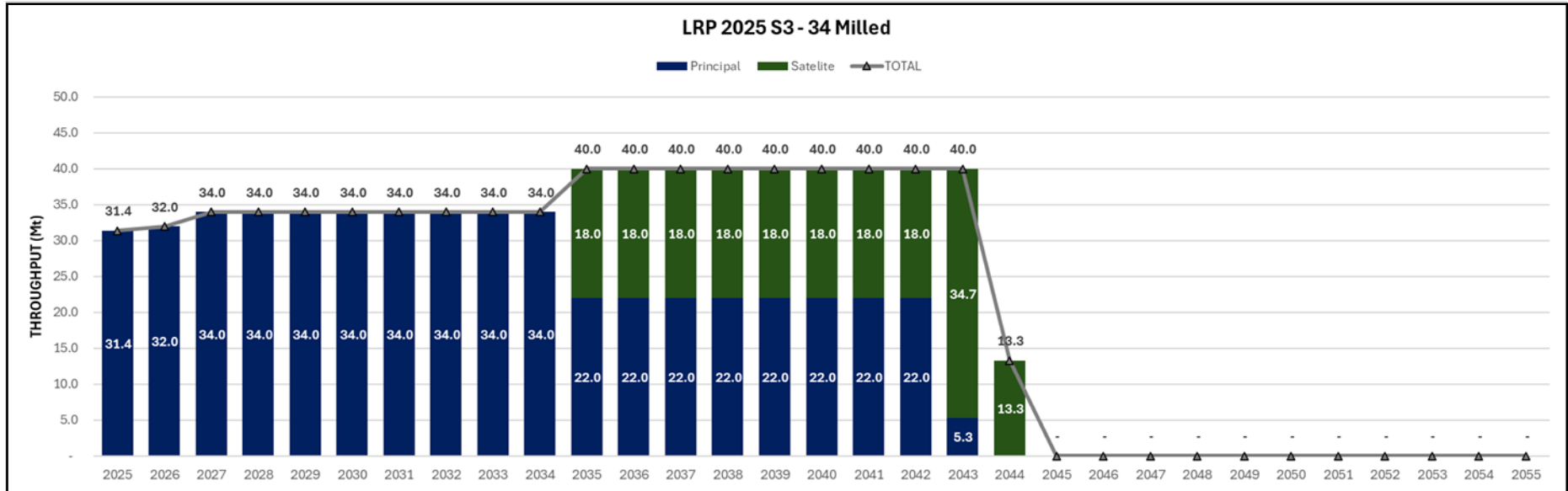
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T34–R517

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2054	2055
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											12	12	12	12	12	12	12	12	29	34	18
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	18

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R192



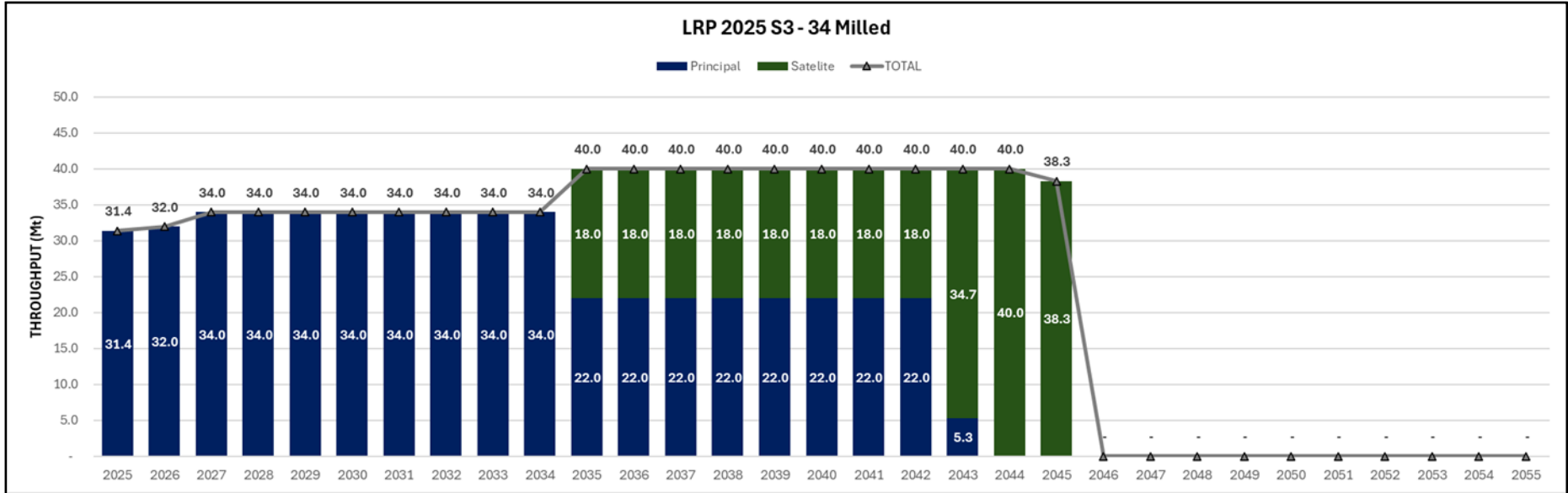
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R192

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5	
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	13
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	13

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R257



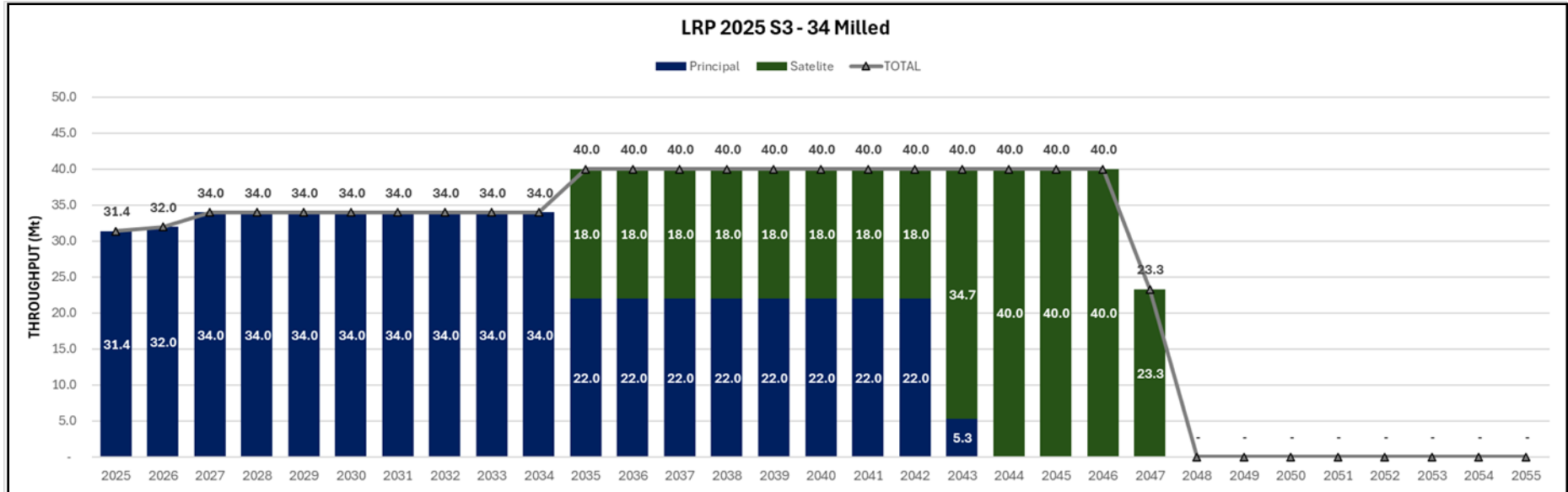
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R257

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	40	38
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	38

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R322



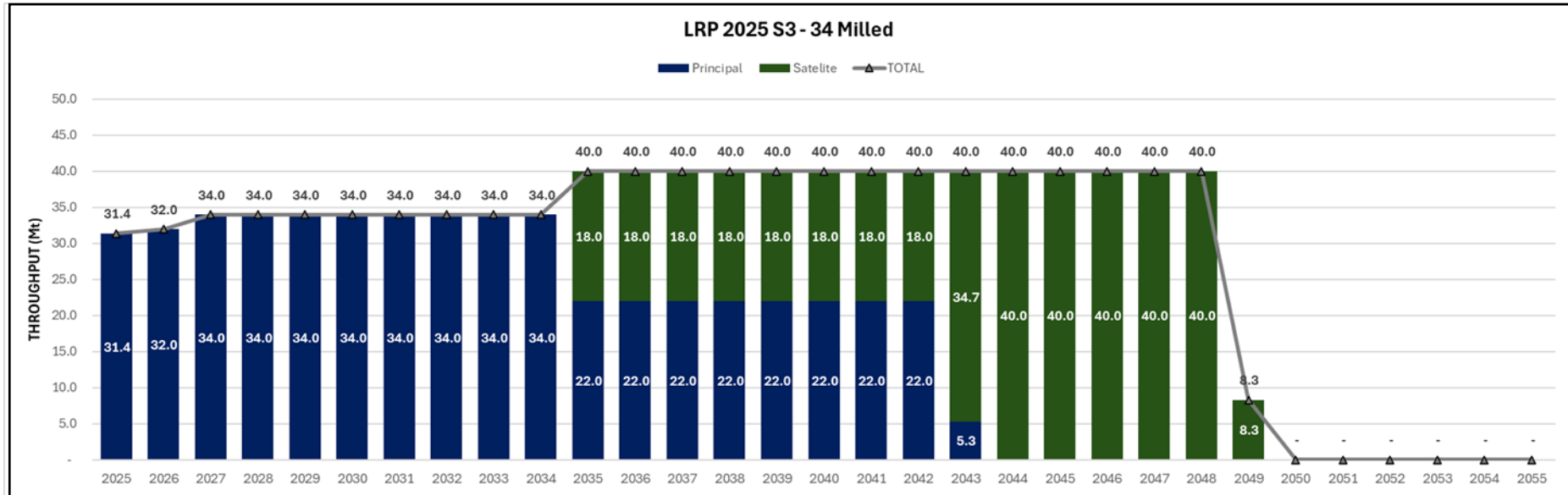
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R322

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5				
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	40	40	40	23
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	23

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R387



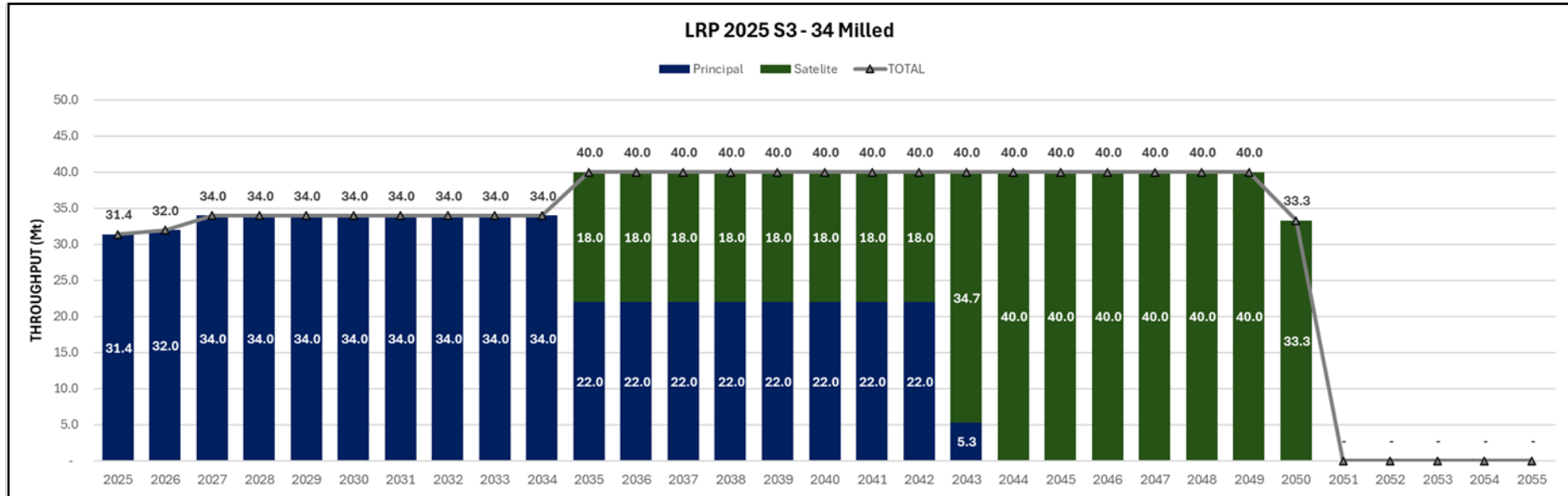
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R387

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5						
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	40	40	40	40	40	8
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	8

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R452



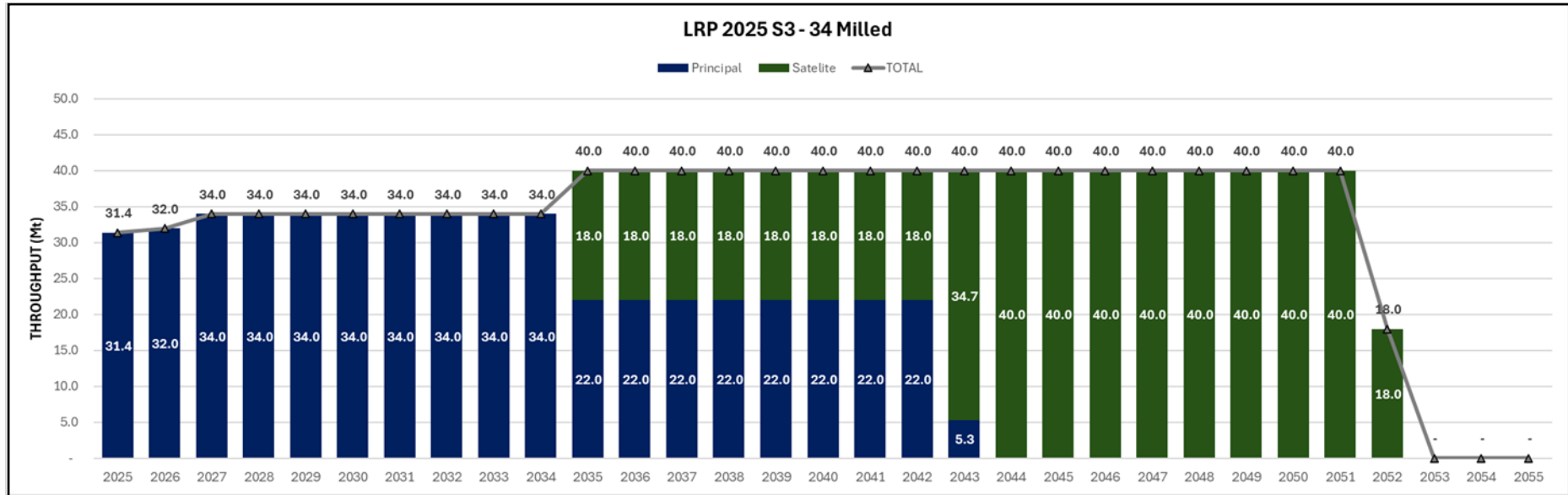
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40-R452

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2049	2050
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	40	33
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	33

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40–R517



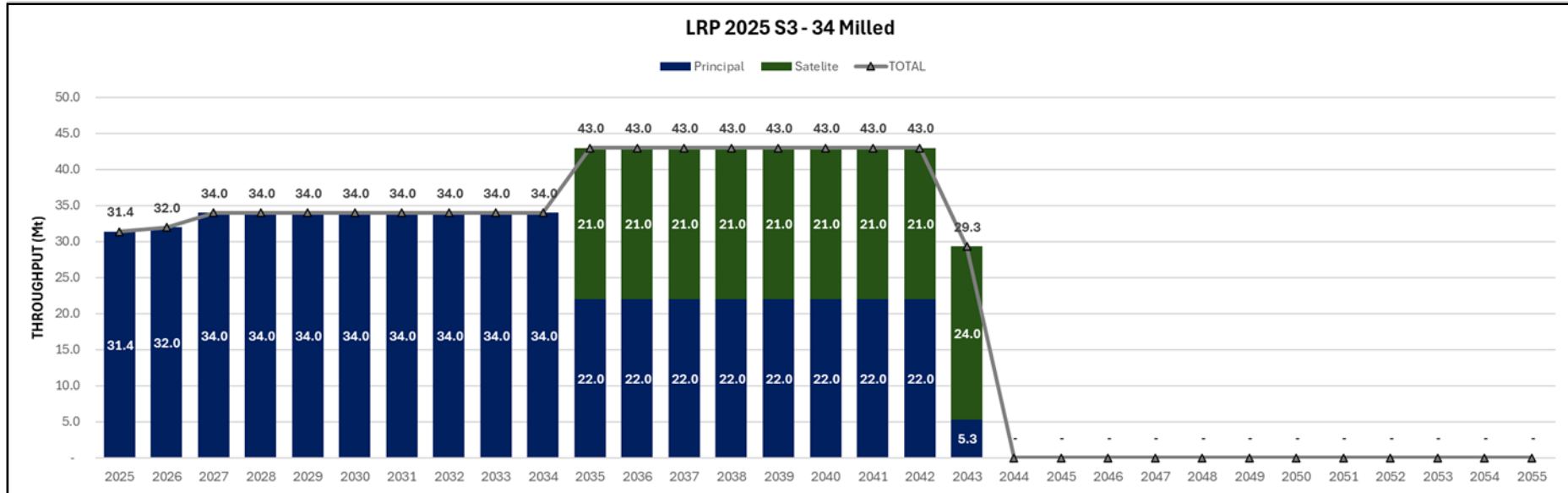
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T40–R517

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2051	2052
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											18	18	18	18	18	18	18	18	35	40	18
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	18

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R192



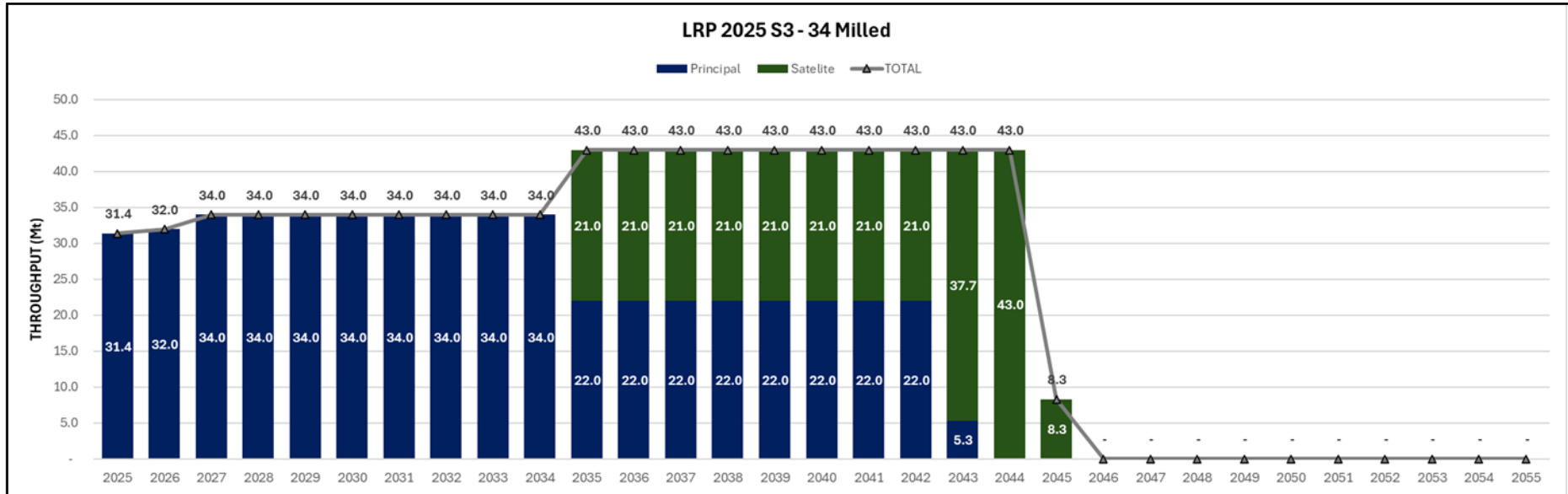
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R192

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	24
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	29

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R257



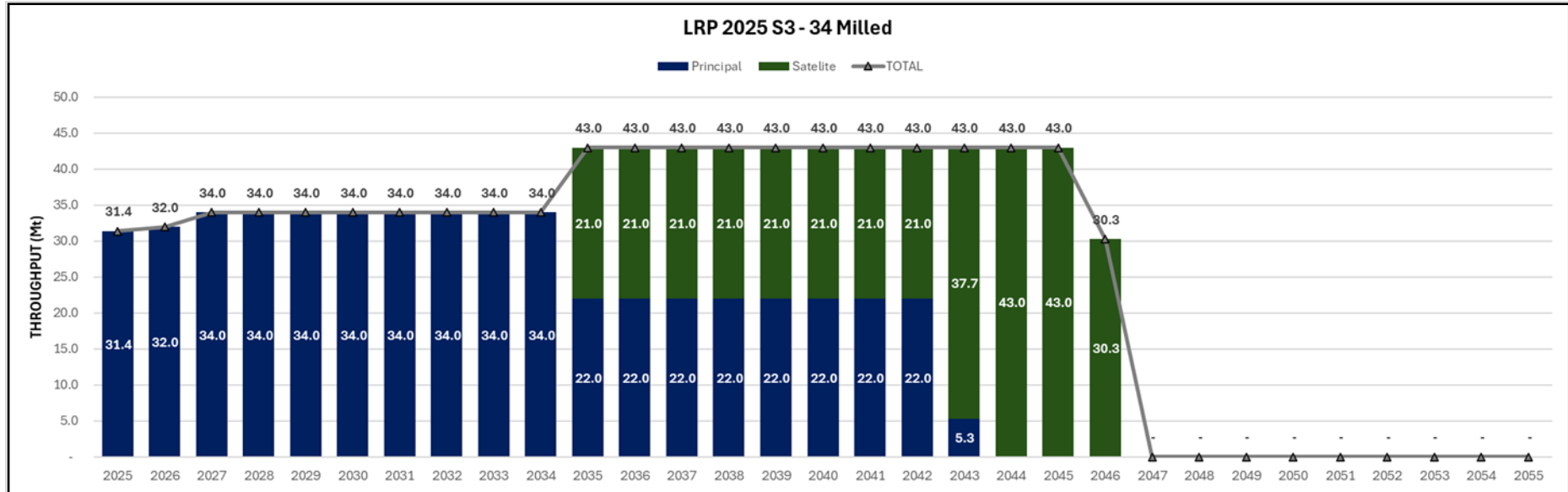
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R257

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	38	43	8
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R322



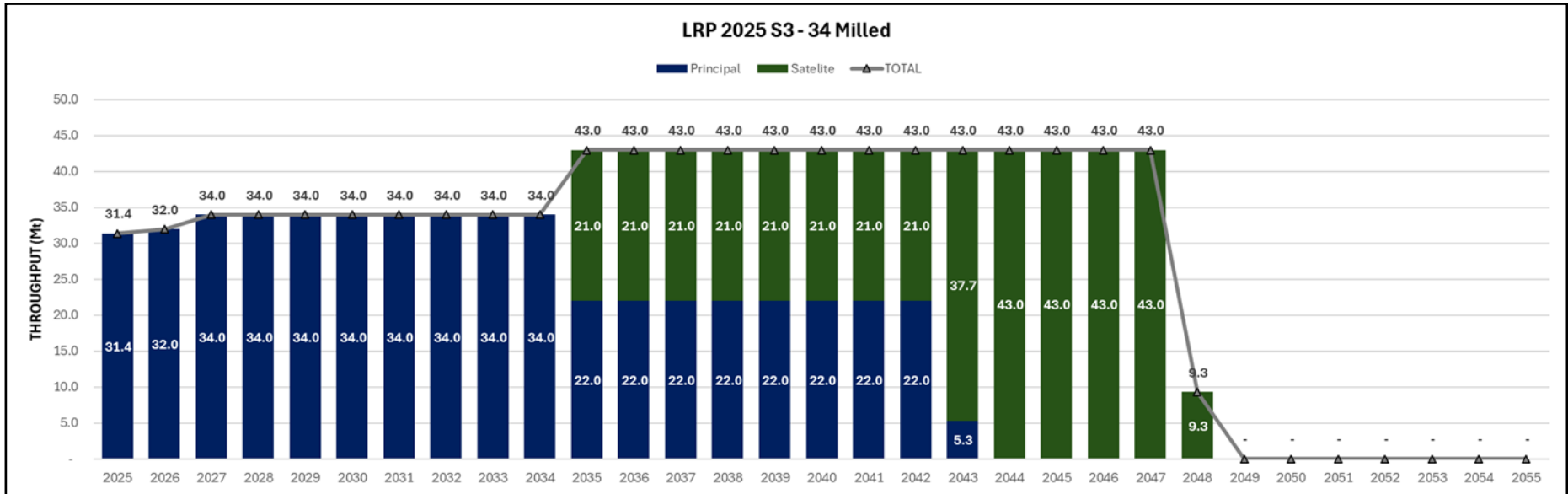
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R322

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5			
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	38	43	43	30
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	30

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R387



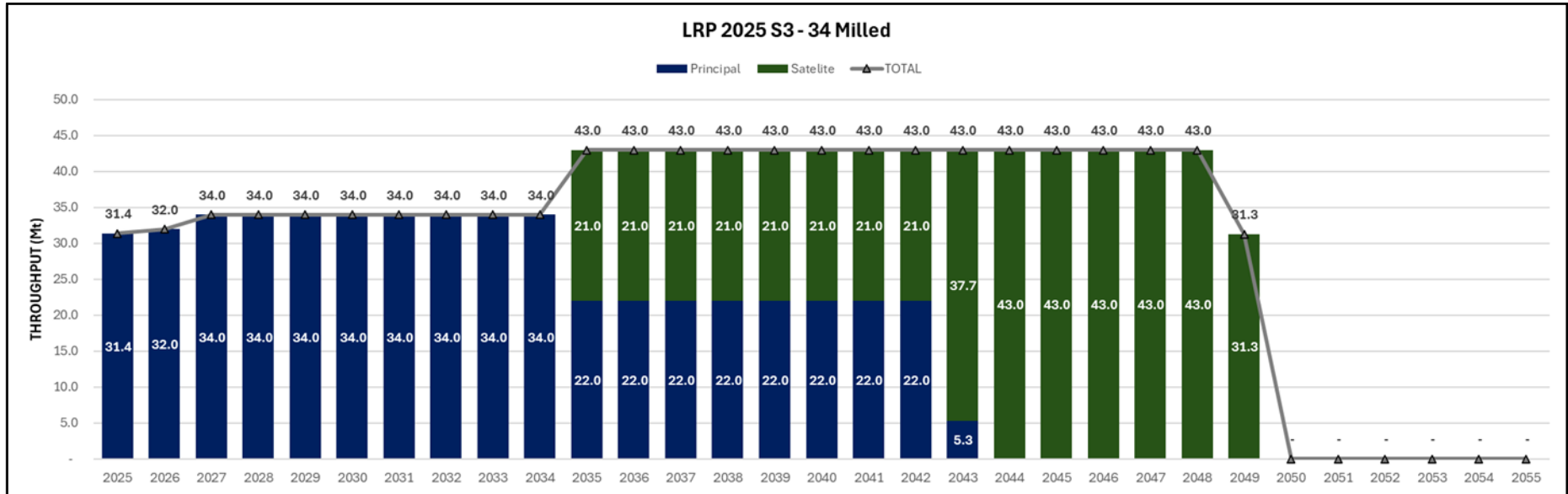
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R387

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2047	2048
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	38	43	9
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	9

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R452



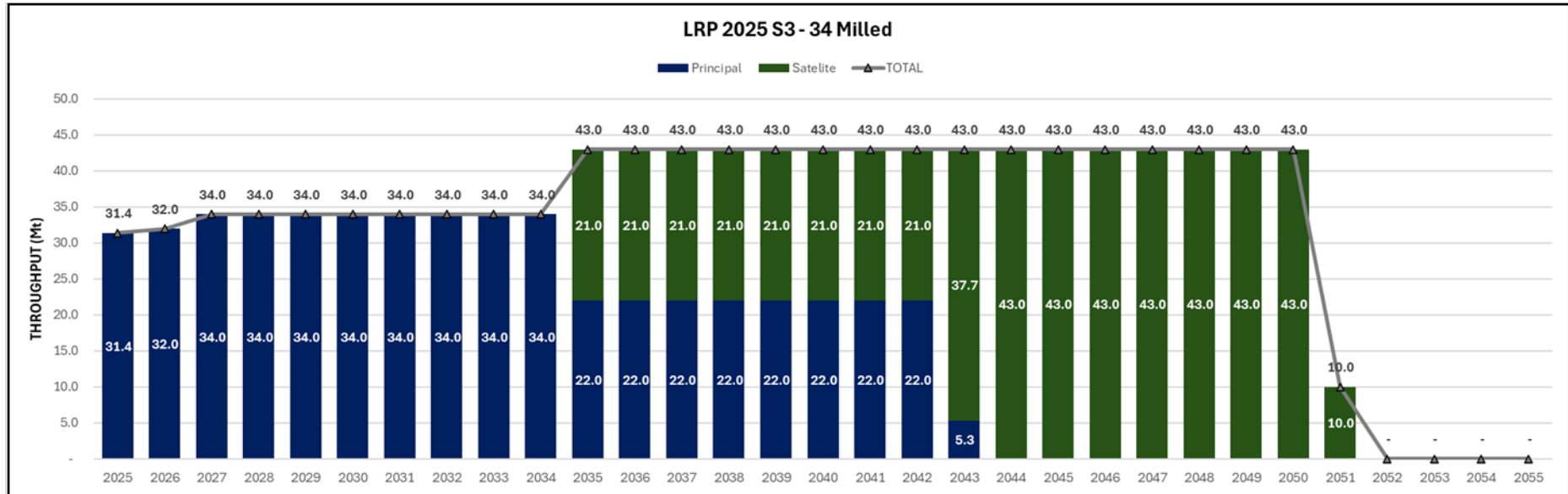
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43–R452

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 - 2048	2049
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	38	43	31
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	31

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R517



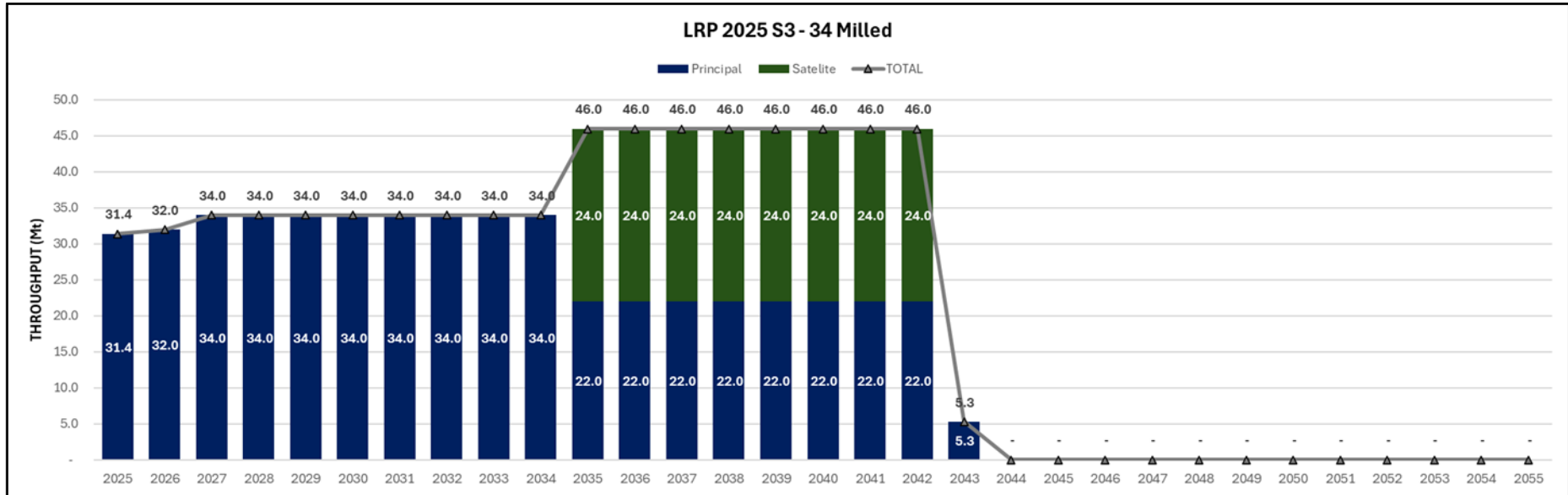
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T43-R517

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 - 2048	2051
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											21	21	21	21	21	21	21	21	38	43	10
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	10

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R192



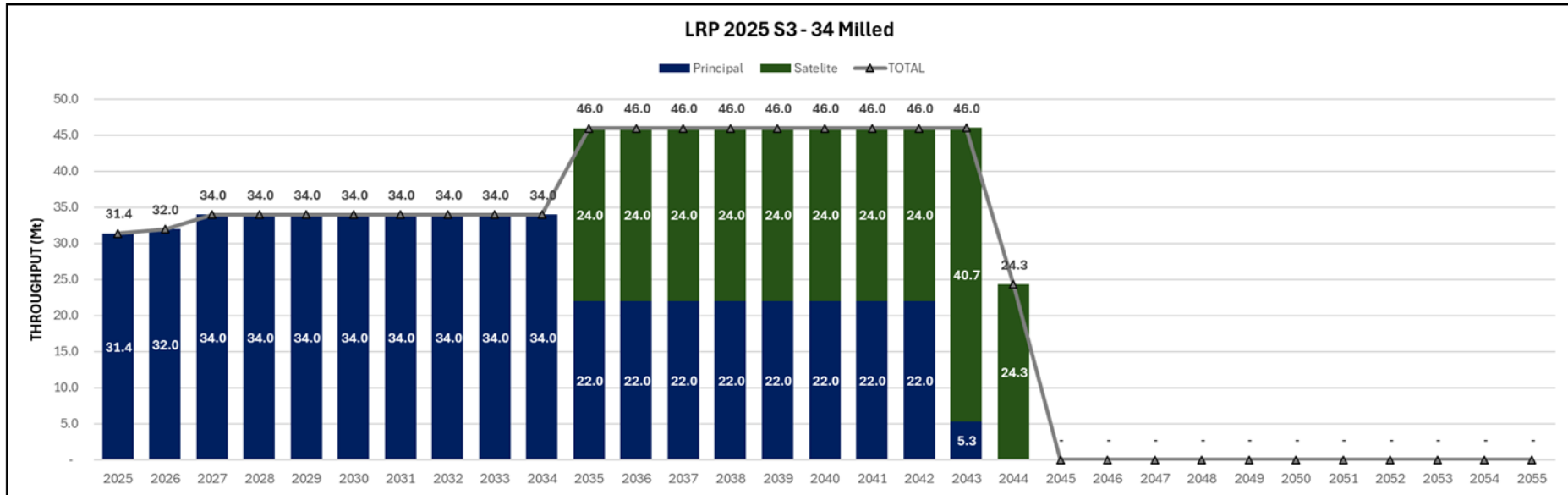
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R192

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	5

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R257



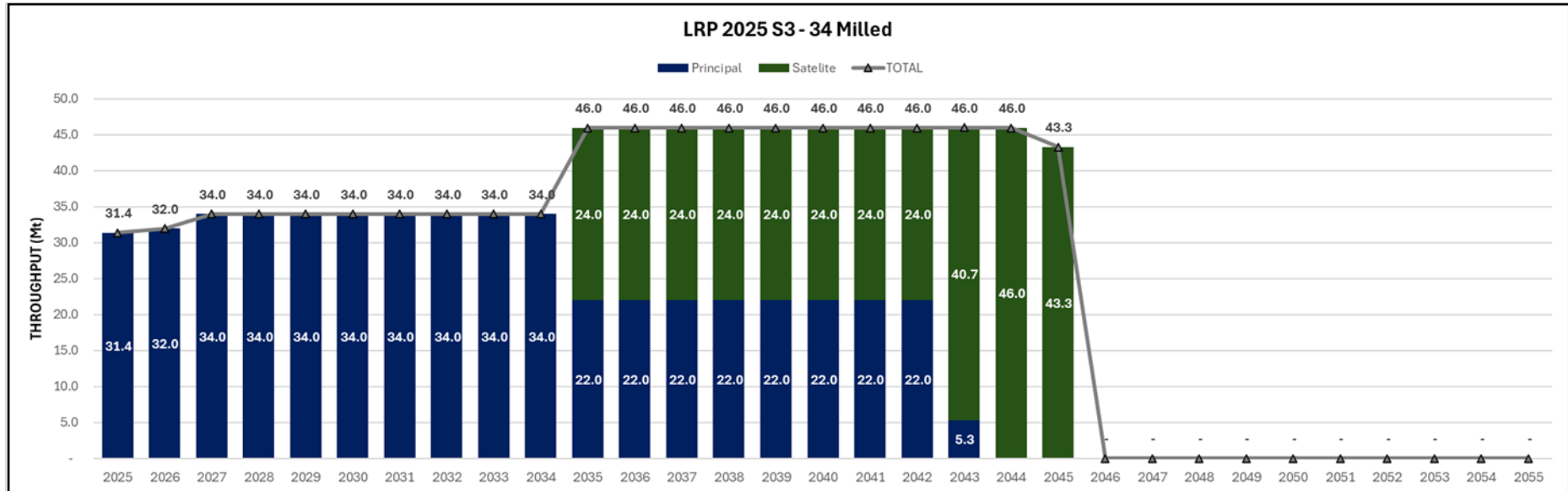
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R257

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5	
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	41	24
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	46	24

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R322



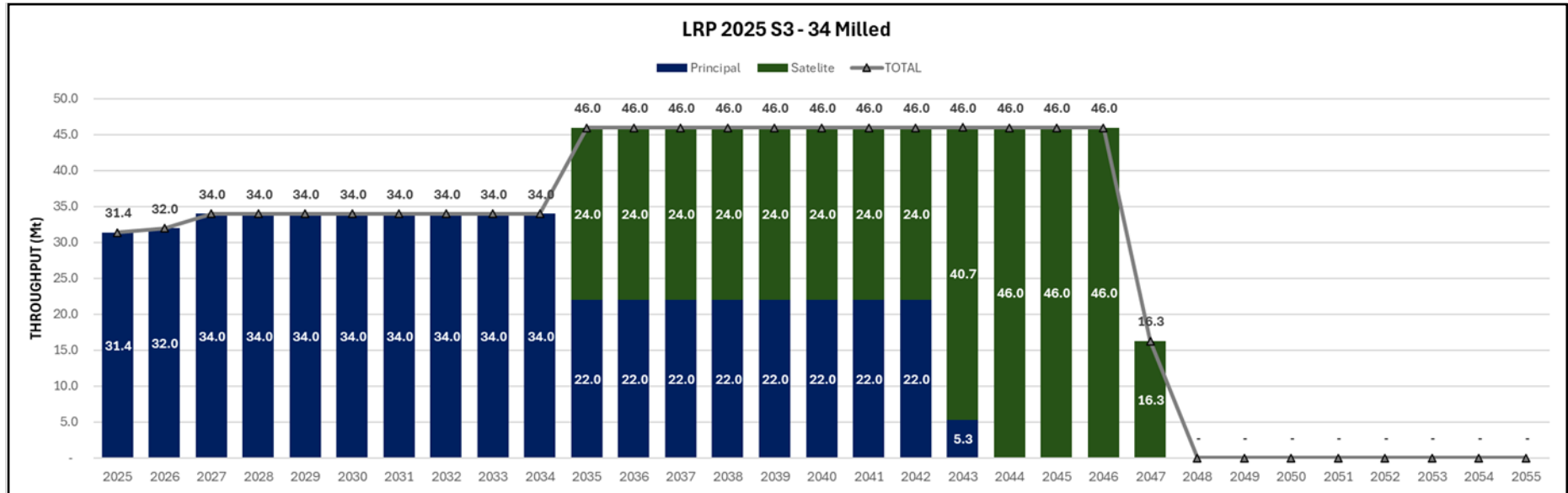
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R322

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	41	46	43
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	43

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R387



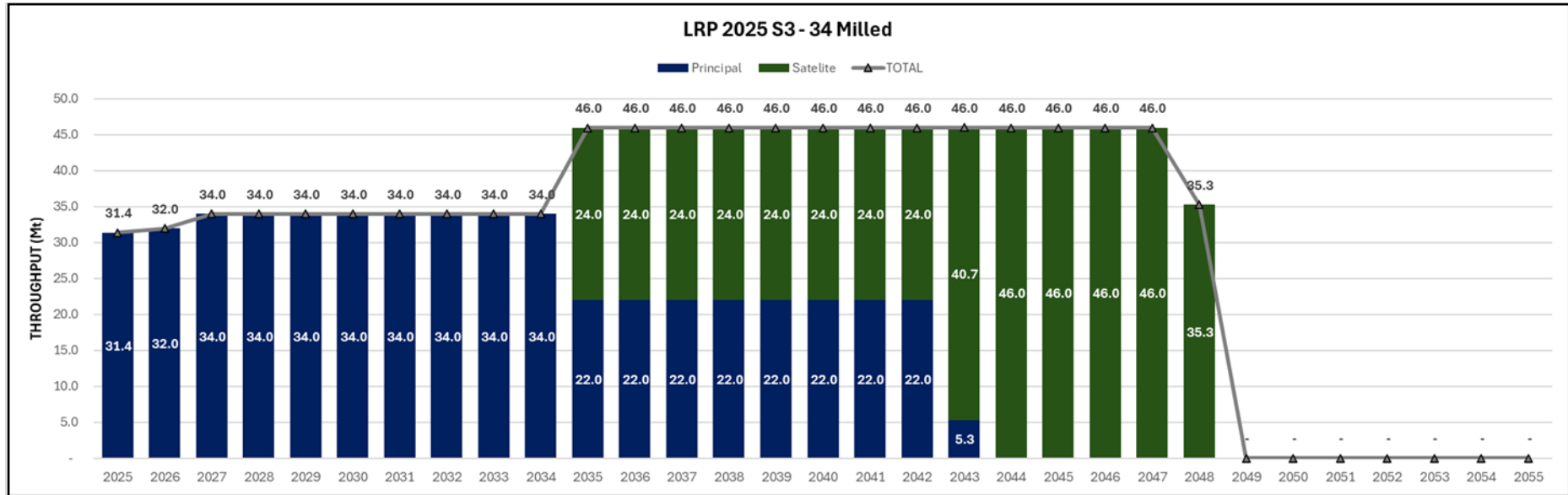
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R387

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5				
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	41	46	46	46	16
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	16

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R452



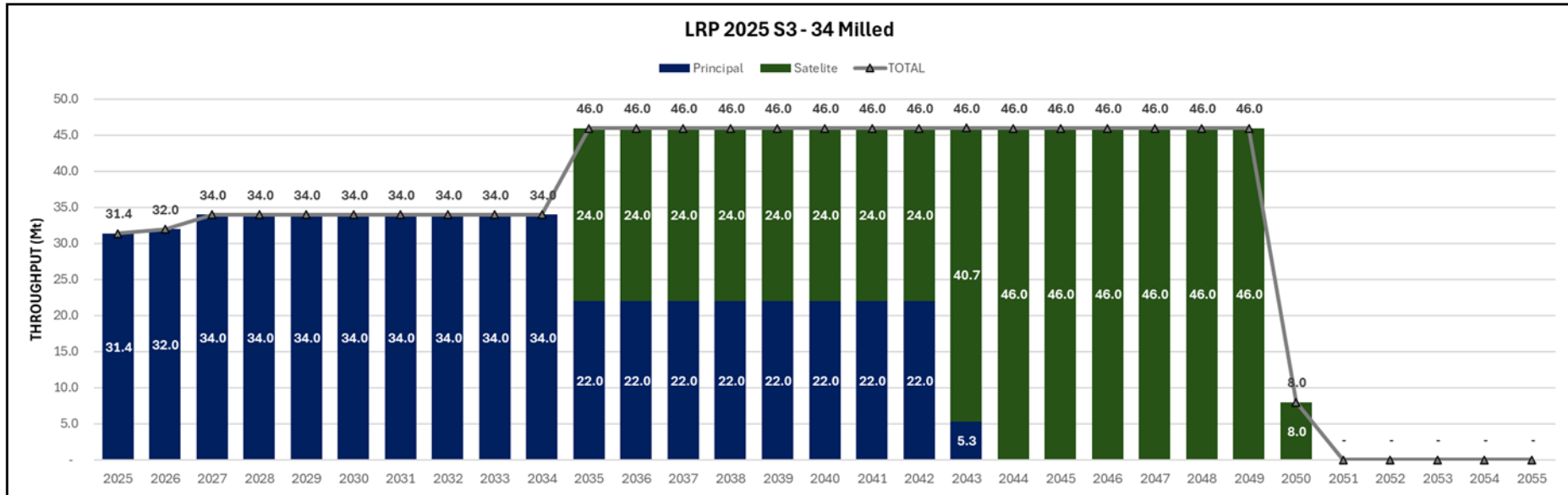
Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R452

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5					
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	41	46	46	46	46	35
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	35

Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R517



Nota: Elaboración propia.

Perfil de producción anual del escenario T46–R517

Zona	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044 – 2049	2050
Principal	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	22	22	22	22	22	22	22	22	5		
Satélite											24	24	24	24	24	24	24	24	41	46	8
Total	31	32	34	34	34	34	34	34	34	34	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	8

Nota: Elaboración propia.