



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

**HERRAMIENTA PARA EVALUAR RECURSOS MINERALES
INCREMENTALES, MINA EL PEÑÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CLAUDIO ANDRÉS SANDOVAL MIRANDA

PROFESOR GUÍA:
HANS GÖPFERT HIELBIG

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
**ELÍAS MONTOYA FERRADA
GONZALO MONTES ATENAS**

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Claudio Andrés Sandoval Miranda
FECHA: 29/06/2018
PROFESOR GUÍA: Hans Göpfert Hielbig

HERRAMIENTA PARA EVALUAR RECURSOS MINERALES INCREMENTALES, MINA EL PEÑÓN

El presente trabajo, que presenta valores factorizados para mantener la confidencialidad de los mismos, busca determinar la factibilidad de la inclusión de minerales incrementales (marginales) mediante una evaluación económica iterativa que procure maximizar el valor del negocio y recalcular la ley de corte óptima de la mina El Peñón, propiedad de Yamana Gold Inc. y operada por Minera Meridian Ltda.

Actualmente, como caso base, la mina el Peñón presenta 40 sectores con reservas económicamente explotables, a una ley de corte equivalente de 4.0 g/ton, con un costo mina fijo de 109.5 US\$/ton de mineral y un costo planta fijo de 34.23 US\$/ton procesada. Respecto al análisis de marginalidad se considera una ley de corte marginal de 1.9 g/ton.

En este análisis, se determinó mediante el estudio de 10 sectores representativos de la mina que la ley de corte óptima corresponde en una instancia primaria a 4.5 g/ton según la metodología de K. Lane y con un incremento a 5.4 g/ton afinando el cálculo mediante la utilización de flujos de caja iterativos obteniendo un aumento en el VAN de 15 MUS\$ respecto al caso base actual. Se realiza además un análisis de marginalidad que determina que la ley de corte marginal corresponde a 2.4 g/ton e incrementa el VAN anterior en 43 MUS\$ con lo que se demuestra que la inclusión de los minerales incrementales logra agregarle valor al negocio minero.

Adicionalmente, se genera un resumen de costos y mineralogías que permite generar costos mina y planta diferenciados por sector y así poder realizar una evaluación económica más precisa según las características intrínsecas de cada sector.

Por último, se entrega una herramienta creada en *Visual Basic Applications* de Office Excel que permite generar estos cálculos de manera automática, utilizando parámetros modificables en el tiempo y analizando múltiples casos posibles de manera simultánea al agregar la iteración dentro del estudio.

ABSTRACT
A TOOL TO EVALUATE INCREMENTAL MINERALS RESOURCES,
MINE EL PEÑÓN

The aim of this work, that presents factored values to maintain their confidentiality, is to determine the feasibility of the inclusion of incremental (marginal) minerals through an iterative economic evaluation that seeks to maximize the value of the business and recalculate the optimal cut-off grade of the El Peñon mine, owned by Yamana Gold Inc. and operated by Minera Meridian Ltda.

Currently, as a base case, the Peñon mine presents 40 sectors with economically minable reserves, with an equivalent cut-off grade of 4.0 g/ton, with a fixed mine cost of 109.5 US \$ / ton of ore and a fixed plant cost of 34.23 US\$/ton processed. Regarding the marginality analysis, a marginal cut-off grade of 1.9 g/ton is considered.

In this study, it was determined through the analysis of 10 representative sectors of the mine that the optimal cut-off grade corresponds in a primary instance to 4.4 g/ton according to the K. Lane methodology and with the increase to 5.5 g/ton refining the calculation using iterative cash flows an improvement of 15 MUS\$ on the NPV is obtained. An analysis of marginality is also carried out, which determines that the marginal cutting law corresponds to 2.4 g/ton and increase the previous NPV in 43 MUS\$, which shows that the inclusion of incremental minerals adds value to the mining business.

In addition, a summary of costs and mineralogies is generated, which permits the generation of different mine and plant costs by sector and thus allows for a more accurate economic evaluation according to the intrinsic characteristics of each sector.

Finally, a tool in Visual Basic Applications of Office Excel is created and delivered, which permits generating these calculations automatically, using parameters that can be modified in time and analyzing multiple possible cases simultaneously when adding the iteration within the study.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todo el equipo de Planificación y Desarrollo del Peñón, en especial a Jimmy, Rodrigo, Marco, Enrique, Ignacio y Maximiliano por el apoyo constante en la memoria y en el manejo de la información y de los softwares, sin ustedes nunca se hubiera materializado esta memoria.

A mi profesor guía Hans y los miembros de la comisión, Elías y Gonzalo quienes siempre tuvieron un momento de su tiempo para efectivamente guiarme a través de todo este proceso de memoria, en especial a Elías por el apoyo en la creación de la herramienta.

A los compañeros de carrera y futuros colegas Ignacio, Javier, Matías, Mauricio, Samu y a los memoristas del Peñón Agustín y Álvaro por el apoyo constante, los buenos momentos que compartimos y todas las experiencias vividas.

A los dañados, Jaime, Cristian, Alexander, Felipe y Bruno por todos los fallos y errores que tuvimos juntos y por la amistad incondicional de cada uno de ustedes.

A mi familia, mis padres José Luis y Verónica, mis hermanos David y Daniela, a la pequeña Agustina y mis padrinos Ricardo y Marlene que siempre fueron un cable a tierra y un apoyo en el proceso de vivir lejos de casa.

A Esteban, Ramiro y Diego por estos 13 años de amistad, siempre dándose un momento para volver a jugar y disfrutar como cuando éramos niños, por ser un cable a tierra y por siempre preocuparse de uno, aún en la distancia.

Por último, a Zinthia, por ser un pilar fundamental dentro de este proceso, por soportarme en los momentos difíciles, por venir a verme cuando lo necesitaba y siempre esperarme en Santiago con una sonrisa, gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DE LA MEMORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
TABLA DE CONTENIDO	v
Capítulo 1 INTRODUCCION	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Alcances del Trabajo	3
Capítulo 2 ANTECEDENTES	5
2.1 Mina El Peñón.....	5
2.2 Sectores de la Mina.....	6
2.3 Sistema de explotación – Cut and Fill.....	6
2.3.1 Condiciones Favorables.....	7
2.3.2 Limitaciones	8
2.3.3 Variantes del Método.....	8
2.3.4 Bench and Fill con relleno cementado y no cementado.....	9
2.4 Recursos y Reservas Minerales.....	11
2.5 Cálculo de Ley de Corte.....	13
2.5.1 Protocolo de Estimación de la Ley de Corte (COG)	13
2.5.2 Determinación de una ley de corte para maximizar el valor de una pequeña operación minera de oro.....	14

2.5.3	Determinación de una estrategia de ley de corte basado en un factor iterativo	18
2.5.4	Procedimiento del Algoritmo.....	19
Capítulo 3	METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	22
3.1.	Análisis Situación Actual (Reservas y COG).....	23
3.2.	Cálculo de Recursos Económicamente Viables.....	23
3.3.	Resumen de costos y recuperaciones por sector y mineralogía.....	23
3.4.	Evaluaciones por sector.....	24
3.5.	Realización de Iteraciones de Flujos de Caja.....	24
3.6.	Toma de Decisiones y Conclusiones.....	25
Capítulo 4	DESARROLLO.....	26
4.1.	Reservas y COG Actual.....	26
4.2.	Resumen de Costos y Mineralogía por sector.....	27
4.3.	Evaluación Económica.....	30
4.3.1.	Curvas de Tonelaje Ley por Sector.....	30
4.3.2.	Ley óptima según Lane para cada sector.....	38
4.3.3.	Ley de corte marginal según Lane para cada sector.....	39
4.3.4.	Criterios del Planificador.....	40
4.4.	Iteraciones de los Flujos de Caja utilizando óptimo global ponderado.....	42
4.4.1.	Ranking 1 – Onzas de oro por cada metro de drift, acceso y desarrollo.....	44
4.4.2.	Ranking 2 – GEO por cada metro de drift, acceso y desarrollo.....	45

4.4.3.	Ranking 3 – Ley de oro	46
4.4.4.	Ranking 4 – Ley de oro equivalente.....	47
4.5.	Iteraciones de los Flujos de Caja utilizando óptimos locales	48
4.5.1.	Análisis de Marginalidad - Ranking 2.....	50
4.6.	Herramienta Creada	52
4.6.1.	Código 1 - Cálculo de Lane	58
4.6.2.	Código 2 - Cálculo de Lane Marginal.....	58
4.6.3.	Código 3 – Ranking de Sectores	59
4.6.4.	Código 4 – Cálculo de Lane por Sector	61
4.6.5.	Código 5 – Cálculo de Flujo de Caja por Sector.....	63
4.6.6.	Código 6 – Generación de Secuenciamiento.....	65
Capítulo 5	CONCLUSIONES.....	66
Capítulo 6	RECOMENDACIONES	68
Capítulo 7	BIBLIOGRAFÍA.....	70
Capítulo 8	ANEXOS.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Variantes del Método de Cut and Fill	9
Tabla 2: Parámetros necesarios para el cálculo de Lane	15
Tabla 3: Parámetros de entrada para el cálculo de la ley de corte.....	20
Tabla 4: Parámetros para la evaluación económica Peñón 2017.....	26
Tabla 5: KPI de los metros en función de las toneladas de mineral de cada sector.	31
Tabla 6: Ley de corte según Lane y toneladas de mineral asociadas, junto a la ley de corte global por Lane.....	39
Tabla 7: Ley de corte marginal según Lane.....	40
Tabla 8: Sectores ordenados según cada uno de los 4 rankings a utilizar.....	41
Tabla 9: Curva de VAN en función de la ley de corte para el primer ranking.....	44
Tabla 10: Curva de VAN en función de la ley de corte para el segundo ranking.....	45
Tabla 11: Curva de VAN en función de la ley de corte para el tercer ranking.	46
Tabla 12: Curva de VAN en función de la ley de corte para el cuarto ranking.	47
Tabla 13: Leyes de corte optimas según flujo de caja por sector.	48
Tabla 14: Comparativa de los VAN obtenidos utilizando óptimos locales y óptimo global.	48
Tabla 15: Vector óptimo de leyes de corte por sector iterando los flujos de caja.....	50
Tabla 16: Curva de VAN en función de la ley de corte marginal para el análisis de los minerales incrementales según el primer ranking.	51

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Recuperación histórica de Plata y Oro en función del consumo de NaCN. (Órdenes y Bastías, 2013)	2
Gráfico 2: Ley de corte optima efectiva para las etapas de mina, procesamiento y mercado de una operación minera.	17
Gráfico 3: Capacidades Mina, Planta y Mercado de cada sector	28
Gráfico 4: Recuperaciones metalúrgicas de Au y Ag por sector.....	29
Gráfico 5: Costo Mina por sector comparado con el caso base.....	29
Gráfico 6: Costo Planta por sector comparado con el caso base.	30
Gráfico 7: Curva Ton-Ley sector caserón 505.....	33
Gráfico 8: Curva Ton-Ley sector caserón 506.....	33
Gráfico 9: Curva Ton-Ley sector Al Este.	34
Gráfico 10: Curva Ton-Ley sector Bonanza.....	34
Gráfico 11: Curva Ton-Ley sector Cerro Martillo.	35
Gráfico 12: Curva Ton-Ley sector Dorada.....	35
Gráfico 13: Curva Ton-Ley sector Discovery Wash.	36
Gráfico 14: Curva Ton-Ley sector Fortuna.	36
Gráfico 15: Curva Ton-Ley sector Martillo Flats.	37
Gráfico 16: Curva Ton-Ley sector Providencia.....	37
Gráfico 17: Curva Ton-Ley de todos los sectores combinados.	38
Gráfico 18: Curva de iteraciones para el Ranking 2 utilizando vector de leyes de corte.	49

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo de Beneficio económico.....	11
Ecuación 2: Ley de Corte Equivalente.....	14
Ecuación 3: Ley de Corte Marginal.....	14
Ecuación 4: Cálculo de Ley de Oro Equivalente y del Factor de conversión de la plata Fag	14
Ecuación 5: Valor Presente según los parámetros utilizados en el cálculo de Lane.....	15
Ecuación 6: Valor presente (V) según limitante: mina, planta y mercado respectivamente.	16
Ecuación 7: Ley de corte mina con factor iterativo.....	19
Ecuación 8: Cantidad minada (Q _{mi}) y Cantidad a refinar (Q _{ri}).....	21
Ecuación 9: Cálculo de ganancias anuales	21
Ecuación 10: Cálculo de VAN incremental.....	21
Ecuación 11: Metros de Drift, Accesos y Desarrollos modelados según KPI	31
Ecuación 12: Toneladas de Estéril en función de los metros de Drift, Accesos y Desarrollo	32
Ecuación 13: Cálculo de Ingresos dentro del Flujo de Caja	42
Ecuación 14: Cálculo de Costos dentro del Flujo de Caja.....	42

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa con el camino desde Antofagasta a la Minera el Peñón.	5
Figura 2: Distribución espacial de mina el Peñón con el año en que cada sector empezó su producción	6
Figura 3: Secuencia de Extracción Bench and Fill	11
Figura 4: Diferentes categorías dentro de una SMU.....	13
Figura 5: Etapas de la metodología de trabajo.....	22
Figura 6: Inputs necesarios para realizar el cálculo de los flujos de caja.	25
Figura 7: Cálculo de Lane para el sector C505 dentro de la Herramienta Creada.	54
Figura 8: Cálculo de VAN y Lc óptima para el ranking 4 - Ley de Au Eq.	55
Figura 9: Plan Mina secuenciado de los sectores según ranking de Ley de Au Eq.	57
Figura 10: Cuadro resumen de los sectores ordenados de mayor a menor según el ranking 1 - Onza/metro.....	59
Figura 11: Lista desplegable de los rankings en donde se utiliza, a modo de ejemplo, el ranking 3 - Ley de Au.	60
Figura 12: Cuadro resumen de los sectores, ordenados de manera automática según el ranking 3 - Ley de Au.	60
Figura 13: Botón que inicia el código.....	61
Figura 14: Lista desplegable para seleccionar el sector al cual calcularle la ley de corte óptima por Lane.	61
Figura 15: Aviso que indica que el cálculo de Lane ha finalizado.	61
Figura 16: Resultado de la consulta de Lane una vez finalizada la iteración para el sector AES.....	62
Figura 17: Botón que inicia el código.....	63
Figura 18: Lista desplegable para seleccionar el sector al cual calcularle la ley de corte por Flujo de Caja.....	63
Figura 19: Aviso que indica que el cálculo del Flujo de Caja ha finalizado.....	63
Figura 20: Resultado de la consulta del cálculo del Flujo de Caja una vez finalizada la iteración para el sector AES.....	64

Capítulo 1 INTRODUCCION

Previo a la presentación de esta memoria profesional, es importante destacar que los datos referidos a tonelajes, leyes, onzas y costos presentan un factor multiplicativo debido a que los resultados originales son confidenciales para la corporación.

1.1 Motivación

Dentro de la operación minera, generalmente es deseable que la planta trabaje al 100% de su capacidad con tal de poder producir la mayor cantidad de producto posible y así aumentar la producción y las ventas de la mina. Sin embargo, cuando las condiciones de la mina cambian respecto a nuevas exploraciones que se realizan una vez finalizada la etapa de construcción y puesta en marcha, lo que se busca es poder adecuarse a las nuevas condiciones con tal de poder seguir maximizando el negocio minero. Por esto, es que existe una búsqueda constante de aumentar la producción mina analizando distintas alternativas, como la factibilidad de extracción de sectores nuevos, incluir stockpiles, minerales marginales, bloques remanentes, entre otros.

El siguiente trabajo de título se desarrolla dentro de la empresa multinacional Yamana Gold Inc., en la mina El Peñón, la cual es operada actualmente por la empresa Minera Meridian Ltda. y busca realizar una evaluación económica, iterando flujos de caja, para determinar si la inclusión de minerales incrementales (conocidos también como marginales) maximizan el negocio minero, encontrando así un nuevo VAN y una nueva ley de corte óptima.

Dicha mina se encuentra ubicada en Chile, en la región de Antofagasta, aproximadamente a 160 km al sureste de la ciudad de Antofagasta. El Peñón se caracteriza por ser un yacimiento de oro y plata, dividida actualmente en las siguientes 5 sub-minas o bloques: Bloque Norte (BN), El Peñón Mina Norte (EPMN), El Peñón Mina Sur (EPMS), Fortuna/Dominador (FODO) y Pampa Augusta Victoria (PAV) las cuales a su vez se subdividen en cerca de 44 sectores, de los cuales, al momento del desarrollo de este informe, 40 presentan reservas económicamente rentables.

Otra particularidad que presenta El Peñón es que está en una transición de minerales oxidados a reducidos, pasando de minerales como el Oro nativo (Au), la Plata nativa (Ag) y el Electrum (AuAg), a minerales como la Argentita (Ag_2S), la Pirargirita (Ag_3SbS_3) y la Polibasita ($(\text{Ag,Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$). Estos últimos, tienen asociados minerales de ganga con alto porcentaje de cobre, como la calcopirita (CuFeS_2) y la Bornita (Cu_5FeS_4), que bajan considerablemente la recuperación de oro y sobre todo la de plata dentro del proceso de cianuración en la planta.

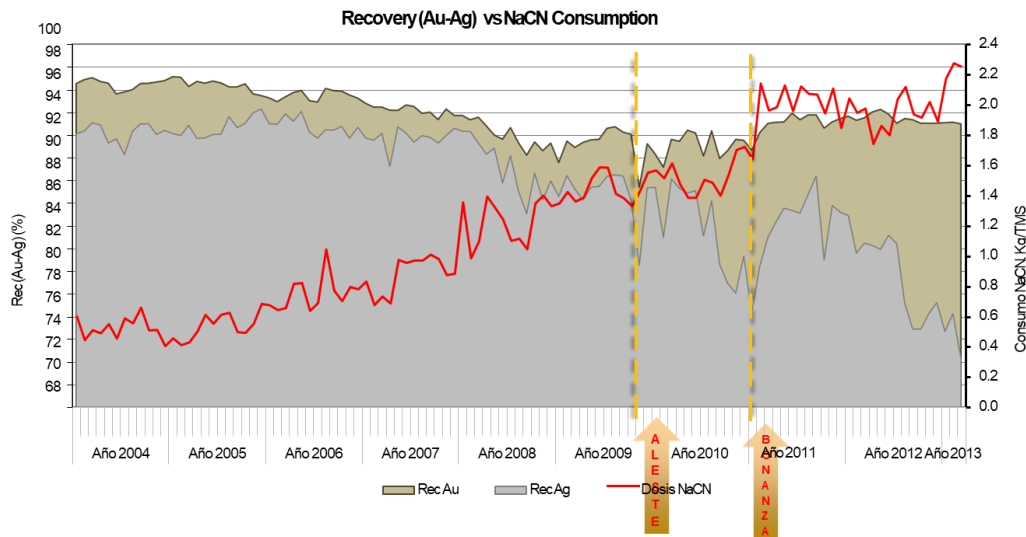


Gráfico 1: Recuperación histórica de Plata y Oro en función del consumo de NaCN. (Órdenes y Bastías, 2013)

Dentro del gráfico anterior, las dos flechas doradas indican como logró repuntar la recuperación con las incorporaciones de la producción de los sectores Al Este y Bonanza. Actualmente, se logra mantener una recuperación cercana al 94% para el Au y de 87% para la Ag, pero mediante un consumo mayor de insumos que influyen directamente en un aumento en el costo planta. [1]

Es en este panorama que, dentro de la Superintendencia de Planificación y Desarrollo de El Peñón, nace la necesidad de estudiar si es posible incluir minerales de baja ley, considerados como marginales, para así maximizar la recuperación minera, aumentando el flujo de mineral a planta y encontrando el valor al cual se maximiza el negocio minero.

1.2 Objetivos

A continuación, se describen los objetivos generales y específicos del trabajo a realizar dentro del trabajo de memoria en la empresa Minera Meridian Ltda.:

Objetivo General	Objetivos específicos
Evaluar económicamente la inclusión de minerales incrementales mediante aproximación primaria por Lane y post-iteración de los flujos de caja de la mina para maximizar de manera global el negocio minero	Generar cálculos diferenciados de ingresos y costos para cada sector de la mina
	Conocer la ley de corte óptima de producción para maximizar el negocio
	Generar una herramienta que facilite el cálculo y la sensibilización de la ley de corte

1.3 Alcances del Trabajo

Se toman en cuenta variables operacionales que determinan el costo mina total (fortificación, relleno, accesos, etc.) para cada uno de los sectores analizados. A su vez, la matriz de recuperaciones existentes depende de las características de mineralogía de la mena y el costo de transporte diferenciado se consideró basado en la distancia real que existe entre el portal de cada bloque de la mina y la planta de procesamiento.

Se consideran capacidades mina y planta basadas en estadística real del yacimiento. Por otro lado, la capacidad de mercado se deja libre del estudio de la aproximación primaria por Lane, asumiendo que es posible vender al mercado todo lo que se produce.

Se considera, para simplificación del cálculo, secciones rectangulares uniformes para accesos, desarrollos y drift en toda la mina, se considera además para estos últimos que el 50% de su contenido corresponde a mineral y el otro 50% a estéril.

No se considera dentro de este estudio la opción de un cambio en la planta, ya sea de reducción o ampliación. Sin embargo, si se considera un perfil de inversiones para cualquier posible costo de capital necesario en el cambio de la ley de corte.

De los 44 sectores que existen dentro del yacimiento, 40 actualmente presentan reservas económicamente rentables. De estos 40, son 22 los sectores que se ubican dentro de lo que se conoce en la compañía como el “80/20”, lo que significa que estos sectores representan en su conjunto el 80% de la producción total de la mina.

De estos 22 sectores, se eligieron a modo de prueba para este estudio a 10 que fueran representativos de cada bloque y que tuvieran todos el mismo método de explotación *Bench & Fill*. Así, desde el bloque FODO se eligió a Fortuna (FOR), desde EPMS los caserones 505 y 506 (C505 y C506), desde EPMN los sectores seleccionados fueron Discovery Wash (DWA), Cerro Martillo (CMA), Dorada (DOR), Martillo Flats (FLA) y Providencia (PRO) y por último desde el BN los sectores Bonanza (BON) y Al Este (AES), no se eligió a ningún sector del bloque PAV debido a que no se encontraba la estadística necesaria para realizar el estudio.

Capítulo 2 ANTECEDENTES

2.1 Mina El Peñón

Mina El Peñón, operada por Minera Meridian Ltda., propiedad de Yamana Gold Inc., comprende un yacimiento de oro y plata de explotación tanto subterránea como rajo abierto y una planta de lixiviación por cianuración.

Esta operación se desarrolla en la II Región de Chile, provincia de Antofagasta, aproximadamente a 160 Km al sureste de la ciudad de Antofagasta, a 24°23' latitud Sur, y 69°29' longitud oeste, o correspondiente a las coordenadas UTM 7,302,000 Norte y 451,000 Este.

El acceso a la zona del proyecto se realiza por la ruta B-475, a la altura del kilómetro 105 de ésta, se encuentra una desviación desde el cual aproximadamente a 50 Km al sur poniente se localiza la faena minera El Peñón. También se puede acceder al área a través de un camino de tierra de 40 Km que empalma con la Ruta 5 Norte en el Km 1,257. La altitud en la zona de la faena (en superficie) se encuentra entre los 1,740 y 1,800 m.s.n.m., al oeste de la Cordillera de Domeyko, que en términos de relieve marca el comienzo de la depresión intermedia de la II Región.

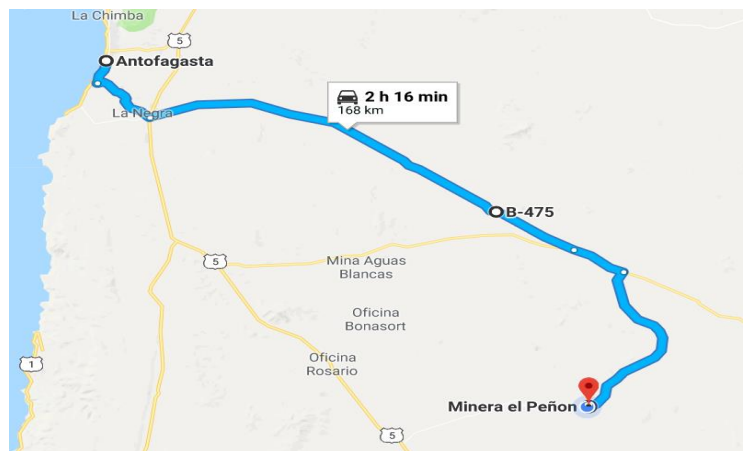


Figura 1: Mapa con el camino desde Antofagasta a la Minera el Peñón.

2.2 Sectores de la Mina

La distribución espacial tanto de los bloques y de los sectores de la mina, así como el año en que cada uno de estos sectores empezó a operar, se puede observar en la siguiente figura:

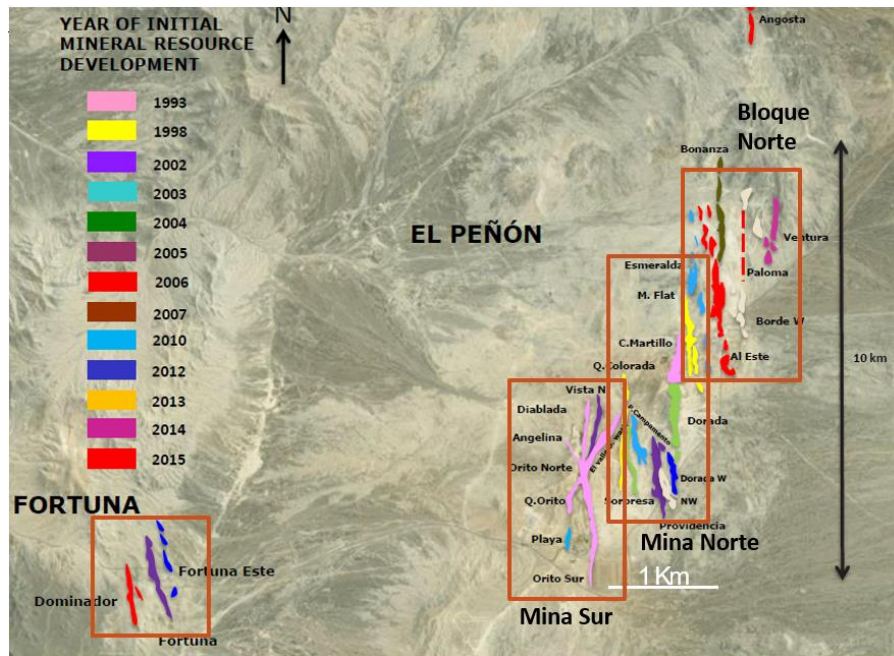


Figura 2: Distribución espacial de mina el Peñón con el año en que cada sector empezó su producción

2.3 Sistema de explotación – Cut and Fill

Cut and Fill es el término amplio aplicado a los métodos mineros que requieren que las excavaciones vacías sean rellenadas con material estéril para facilitar la continuidad de la producción. Se requiere que el relleno provea soporte para las labores subsecuentes o sea una plataforma para el minado posterior. El método de *Cut and Fill* puede ser aplicado en conjunto con otros métodos de explotación como los son el *Blasthole Stopping* o *Drift and Fill*. [2]

El clásico *Cut and Fill* involucra el minado sucesivo de tajadas de mineral horizontal o inclinado, en dirección ascendente a través de un cuerpo mineralizado tabular subvertical relativamente angosto. Esta labor es seguida del emplazado de un relleno no cementado de roca estéril o relleno de arena hidráulico, para crear un nuevo y más elevado acceso al cuerpo mineralizado y soportar el piso debajo de la labor. El alza de los niveles producto del relleno, provee acceso, ventilación remoción de estéril y el drenaje de agua.

Las variantes modernas usan relleno en pasta y típicamente usan acceso en rampas para permitir el uso de equipos mineros mecanizados.

Ninguno de los métodos descritos anteriormente puede asemejarse a la productividad o el bajo costo mina de los métodos masivos de explotación. El método de *Cut and Fill* es escogido por sobre otros métodos porque es económicamente más atractivo para la misma situación.

2.3.1 Condiciones Favorables

El método *Cut and Fill* es aplicable a una amplia variedad de situaciones, incluyendo la siguientes:

- Zonas mineralizadas irregulares en forma y orientación.
- Ley de mineral alta y el control de la dilución es crítica.
- El contacto preciso entre mineral y estéril es crítico estructuralmente pero no fácilmente visible.
- La roca caja es débil.
- Las zonas mineralizadas son amplias, pero la calidad de la roca es débil.
- Se requiere estabilidad de la mina localizada.
- La alteración de la superficie debe ser minimizada.
- Se necesita la existencia de una plataforma para avanzar hacia arriba en el minado del cuerpo.

Los métodos de *Cut and Fill* son favorecidos cuando el valor del mineral es relativamente alto y la tasa de dilución no puede ser cumplida satisfactoriamente con métodos mineros de caserones abiertos o métodos de hundimiento. Si las aperturas son suficientemente pequeñas y las condiciones de roca son competentes, los bordes irregulares de mineral pueden ser minados con caserones abiertos, sin relleno en retroceso. Sin embargo, cuando las aperturas son mayores y las condiciones de roca son menos favorables, el relleno en retroceso se hace necesario para una producción económicamente segura.

Los métodos de relleno son útiles cuando la estabilidad regional es necesaria. Es el caso cuando donde grandes caserones vacíos pueden afectar adversamente la estabilidad de galerías permanentes, piques o accesos a la mina. Estos esfuerzos también pueden afectar nuevos caserones de producción de la mina o incluso infraestructura de la superficie.

2.3.2 Limitaciones

Los factores límite de aplicabilidad del método *Cut and Fill* son los siguientes:

- La disponibilidad de suficiente material apropiado para rellenar.
- Producción, preparación, transporte y costo del material de relleno.
- Almacenamiento y prestaciones para alcanzar la demanda del ciclo minero.
- Congestión e interrupción de las actividades de producción minera.

La principal contra del método del método *Cut and Fill* es el costo de producir, preparar, transportar y colocar el relleno. No todo el material inmediatamente disponible para relleno es apropiado; el material de relleno debe calzar con el uso para el cual está destinado. El material que esta inmediatamente disponible y menos costoso, quizás no tenga características que permitan usarlo como relleno. El material que está disponible más fácilmente puede que no sea usable en el diseño del caserón dictado por el tamaño y forma del cuerpo mineralizado, además el sistema de manejo de estéril puede que no sea práctico.

2.3.3 Variantes del Método

Hay numerosos tipos de métodos derivados del *Cut and Fill* y muchas combinaciones híbridas. Lo siguiente es una serie básica de descriptores:

Tabla 1: Variantes del Método de Cut and Fill

Progresión vertical de la mina	Método Minero	Tipo de Relleno	Tiempo
Underhand (Minería debajo del relleno - realce)	Drift and Fill	Relleno cementado	Simultáneo
	Postpillar	Relleno no cementado	
	Bench and Fill	Relleno de arena	Con retraso
Overhand (Minería sobre el relleno - rebaje)	Blasthole Stopping	Relleno en pasta	

En este trabajo se hará énfasis en el método de *Bench and Fill* ya que es el más utilizado dentro de la mina El Peñón.

2.3.4 Bench and Fill con relleno cementado y no cementado

De acuerdo con la teoría, *Bench and Fill* es aplicado a caserones verticales a subverticales que tienen suficiente ancho, largo y roca de pared competente que permite un sistema de tronaduras en retroceso, seguido por un relleno de roca estéril. Este método permite variaciones en la ubicación del relleno. La cantidad de mineral estéril expuesto en la tronadura y el relleno en la frente de avance puede ser ajustado de acuerdo con las condiciones locales. En algunos casos, el relleno de estéril va avanzando a medida que el espacio abierto es completamente eliminado. Esta falta de espacios abiertos aumenta el soporte para condiciones de paredes colgantes débiles y *footwall* débiles, esto reduce la dilución y la pérdida de mineral. El uso de algunos rellenos cementados para aumentar los rellenos no cementados puede incluso aumentar la recuperación.

El uso de relleno sin cementar tiene la ventaja de eliminar los costos del uso del cemento. Sin embargo, tiene sus limitaciones cuando se usa como relleno primario debido a la falta de resistencia en comparación al relleno con cemento. Por lo tanto, es raramente usado donde se planifica la extracción de caserones adyacentes o bajo el caserón a explotar. Además, dicta una secuencia *bottom-up* o el uso substancial de lozas de cemento que entregan estabilidad a la operación y luego quedan de techo para el nivel inferior entre niveles.

Usualmente, el realizar relleno con roca sin cemento tiene la ventaja de poder utilizar cualquier tipo de roca estéril ya disponible y con costos prácticamente nulos. Frecuentemente, la marina de los desarrollos es lo que se utiliza ya que esto elimina el costo de transportar la marina hasta la superficie para luego ser depositada como estéril. Alternativamente, las rocas pueden ser llevadas a superficie y luego enviadas a los caserones bajo tierra a través de labores verticales que transportan el estéril a través de dos o más niveles denominados *waste pass* pero estos no son utilizados dentro de mina El Peñón.

Debido a su textura áspera, el relleno de roca generalmente es mezclado con arena o arena cementada para que la superficie sea menos susceptible a pérdidas de mineral o dilución.

En específico en esta faena, este método consiste en la explotación de las vetas mediante subniveles construidos entre 10 y 20 m (cota piso). Posterior a la construcción de las labores de preparación, se efectúa perforación vertical con equipos Simba, con diámetros de 2 ½” para producción y 3 ½” para escareado, entre los niveles. Esta perforación permite efectuar tronadura por banqueo, para lo cual es necesaria la construcción de una chimenea de manera de generar la primera cara libre, mediante el método VCR. Para las posteriores caras libres se realiza mediante VCR y/o construcción de chimenea con polietileno de baja densidad, en la zona de contacto entre el pilar de hormigón y la siguiente fase de producción, para luego tronar en tajadas o cortes que varían entre 6 y 16 m de altura de banco. El mineral tronado en el caserón es extraído mediante equipo LHD remoto, siendo la distancia máxima para entrar en el caserón abierto de 20 m. Para controlar este recorrido máximo dentro del caserón, se construyen topes de hormigón utilizando el mismo equipo LHD remoto. [3]

A fin de controlar la estabilidad de la explotación y minimizar el daño a las cajas, reduciendo la dilución del mineral, se consideran caserones con un radio hidráulico máximo estable definido de acuerdo con el método de estabilidad gráfico (método de Mathews), el cual indica, en términos generales, que el radio hidráulico máximo estable varían entre 7 a 8 m. Una vez terminada la explotación de un caserón, se da inicio a un ciclo de relleno de la totalidad del caserón abierto, antes de iniciar el siguiente caserón.

Cabe destacar que los primeros metros de relleno del caserón (contiguos al siguiente módulo de arranque) deberán quedar con relleno cementado para generar una pared estable una vez iniciado el próximo ciclo de explotación.

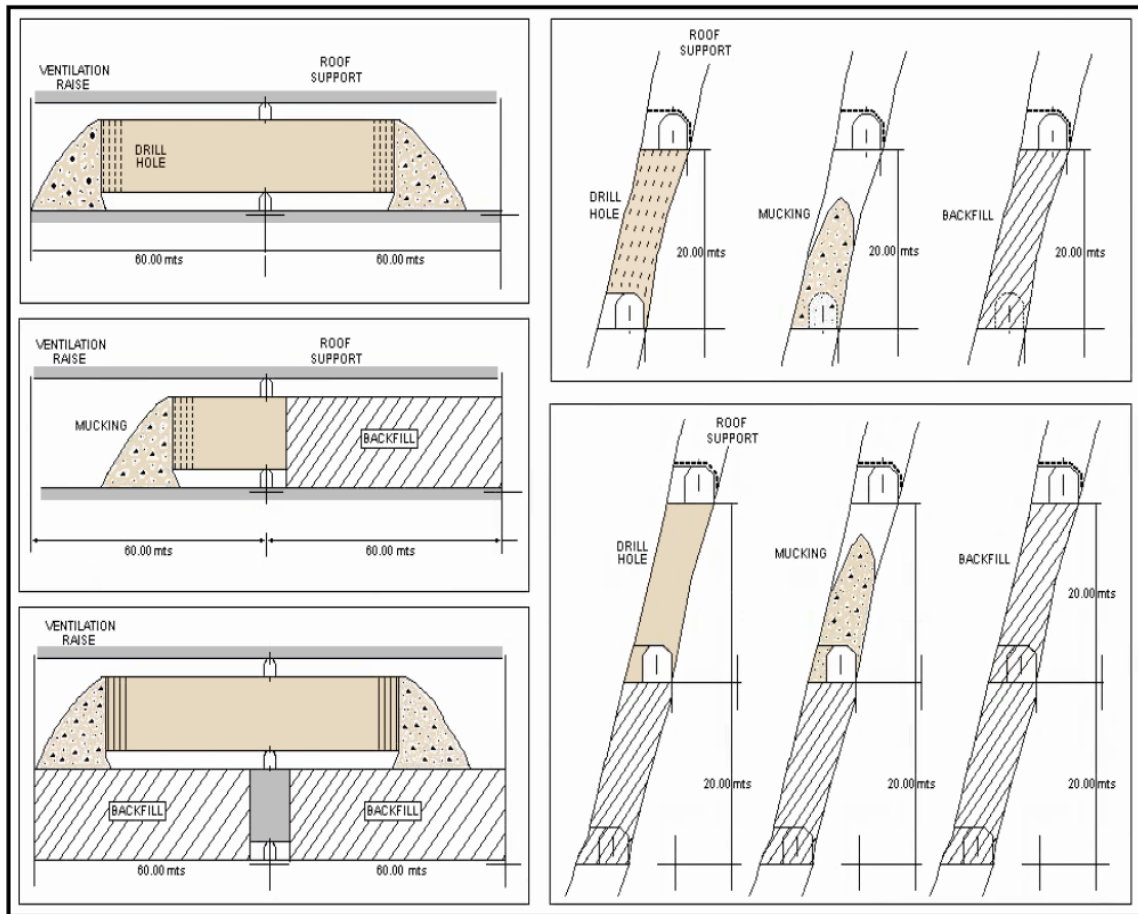


Figura 3: Secuencia de Extracción Bench and Fill

2.4 Recursos y Reservas Minerales

La metodología empleada para el proceso de estimación de reservas en Faena El Peñón, es realizar un diseño minero, práctico y operacional, sobre una *gradeshell* generada con una ley de corte de Au equivalente. Estas unidades mínimas de explotación se denominan SMU, las cuales son evaluadas por un modelo económico basado en la ecuación básica:

$$\text{Beneficio} = (\text{Ingreso} - \text{Costos}) \text{ [US\$]}$$

Ecuación 1: Cálculo de Beneficio económico

El proceso parte calculando la ley de corte marginal para los recursos y una ley de corte mina equivalente, a través de un análisis en donde las variables de entrada corresponden a los costos mina, costos de procesamiento, costos de venta (*selling cost*), recuperaciones metalúrgicas de Au y Ag y precio del Au y de la Ag corporativo.

Una vez entregadas las leyes de corte se procede a la modelación de los recursos. Posteriormente sobre este modelo geológico se construyen las SMU, conocidas también como las unidades básicas de explotación. Entonces, aquellas SMU evaluadas con beneficio positivo se analizan de manera tal que, si el valor generado cubre los costos operacionales, costos de procesos y venta, pasan a ser parte del inventario de reservas. En aquellos sectores más lejanos de los accesos actuales, las SMU con beneficio positivo deben ser capaces de pagar los nuevos accesos e inversiones antes de ser incluidos en el inventario de reservas. Adicional a esto, se realiza un análisis de temporalidad mediante la herramienta *Gantt* de Vulcan en donde se realiza un secuenciamiento de las SMU para ver cuáles son factibles operacionalmente de extraer y formar parte del inventario de reservas oficial.

Esta metodología es en base a los estándares del CIM (*Canadian Institute of Mining*) y la reglamentación del *technical report* corporativo NI43-101, el cual señala que los “Recursos Medidos (1) e Indicados (2)” son aquellos que pueden categorizarse como Reservas. Los recursos inferidos (3) no pueden ser categorizados como Reservas y que el estéril o dilución, dentro de la empresa, se cataloga como (-1) pero no es una reserva ni recurso. [4]

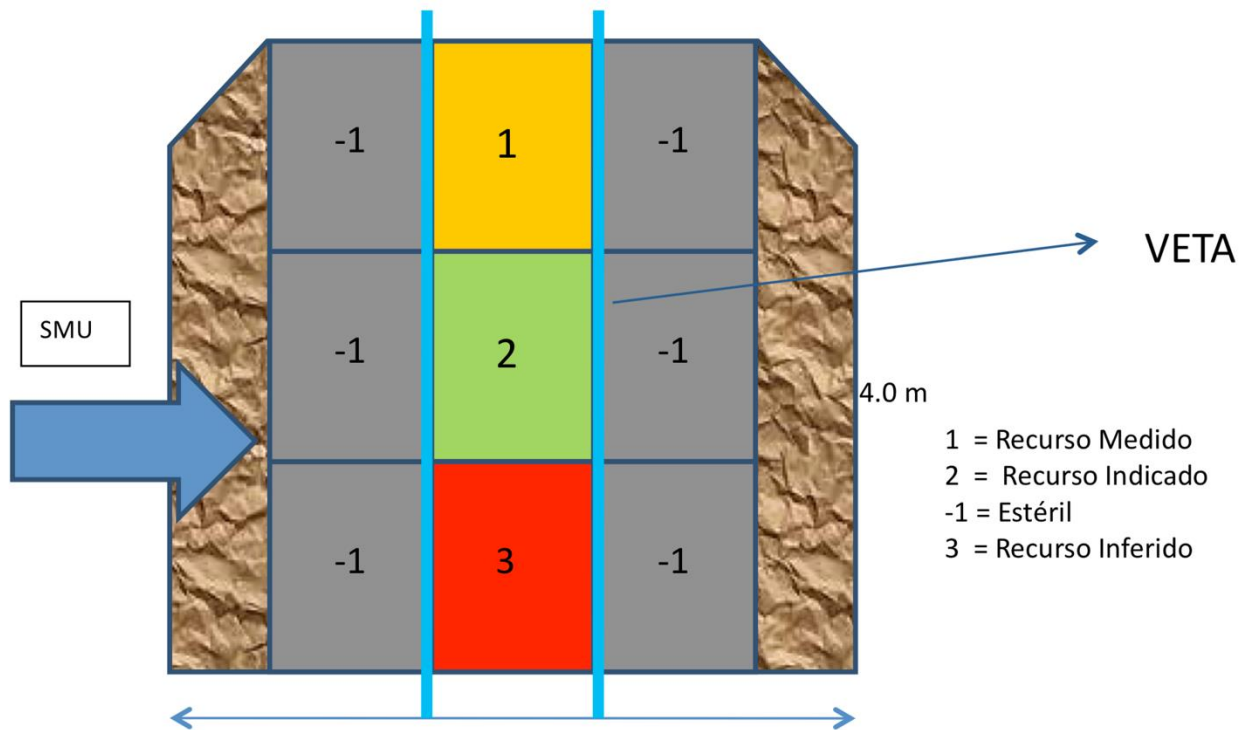


Figura 4: Diferentes categorías dentro de una SMU

2.5 Cálculo de Ley de Corte

2.5.1 Protocolo de Estimación de la Ley de Corte (COG)

Dentro de la corporación se integran dos conceptos definidos según los distintos costos en que se incurran, conocidos como ley de corte equivalente (COG – cut off grade) y ley de corte marginal. La primera, se define como la concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento que haga posible pagar los costos de su extracción, tratamiento y comercialización. Mientras que la segunda se define como aquella en donde no son considerados los costos de ciertas operaciones unitarias de la mina debido a que no se vuelven a realizar, obedece por tanto a una subvención de la ley de corte equivalente ya que estas operaciones que no vuelven a realizarse no implican ningún gasto posterior. Esta subvención también incluye a los costos fijos de todas las operaciones unitarias que presenta el proceso minero de mina El Peñón. [5]

Las fórmulas para el cálculo de cada una de estas leyes se presentan en las ecuaciones 2 y 3:

$$L_c = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \dots + C_n) \cdot FC}{(P_{Au} - S_{Au}) \cdot RM_{Au} + (P_{Ag} - S_{Ag}) \cdot RM_{Ag} + (P_{otro} - S_{otro}) \cdot RM_{otro}}$$

Ecuación 2: Ley de Corte Equivalente

de minerales incrementales no se consideran algunas operaciones unitarias (como la fortificación, los accesos y los desarrollos, entre otros), la ecuación queda de la siguiente manera:

$$L_{cm} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \dots + C_i) \cdot FC}{(P_{Au} - S_{Au}) \cdot RM_{Au} + (P_{Ag} - S_{Ag}) \cdot RM_{Ag} + (P_{otro} - S_{otro}) \cdot RM_{otro}} \left[\frac{g}{ton} \right]$$

Ecuación 3: Ley de Corte Marginal

$FC = \text{Factor de Conversion de gramos a onzas} \left[\frac{g}{oz} \right]$

$C_{1,2,3,4,\dots,i,\dots,n} = \text{Costos de cada operacion unitaria del proceso minero (con } i < n) \left[\frac{US}{ton} \right]$

$P_{Au,Ag,Otro} = \text{Precio del Oro, de la Plata o de Otro metal respectivamente} \left[\frac{US}{oz} \right]$

$S_{Au,Ag,otro} = \text{Costo de venta (selling cost) del oro, de la Plata u otro metal respectivamente} \left[\frac{US}{oz} \right]$

$RM_{Au,Ag,Otro} = \text{Rec. Metalurgica del Oro, de la Plata o de Otro metal respectivamente} [\%]$

Otra característica importante por destacar dentro del trabajo es que para la realización de los cálculos de ley de corte se trata de evaluar mediante un solo mineral, dejando en segundo plano el análisis exclusivo para el oro y el análisis exclusivo para la plata. Es aquí donde nace el concepto de “Oro Equivalente”, referido a un indicador de la corporación denominado “GEO” (Onzas de Oro Equivalente en español), el cual se calcula de la siguiente manera:

$$L_{AuEq} = L_{Au} + \frac{L_{Ag}}{F_{Ag}}, \text{ donde } F_{Ag} = \frac{(P_{Au} \cdot RM_{Au})}{(P_{Ag} \cdot RM_{Ag})}$$

Ecuación 4: Cálculo de Ley de Oro Equivalente y del Factor de conversión de la plata F_{Ag}

2.5.2 Determinación de una ley de corte para maximizar el valor de una pequeña operación minera de oro

El trabajo realizado en el campo de la optimización del grado de corte no ha avanzado mucho más allá del trabajo realizado por Lane en 1988. Su trabajo definitivo se basa en el

cálculo del criterio del Valor Presente Neto (VPN o VAN), que es el más ampliamente comprendido, consistente y apropiado método por el cual se pueden representar los flujos de efectivo secuenciales que surgen de la extracción de reservas minerales de un recurso agotable. Aunque la matemática no es compleja, el método de Lane no es un enfoque ampliamente apreciado o aplicado para maximizar el valor de una operación minera a través de la selección y el equilibrio de las leyes de corte operacionales.

Para realizar este cálculo, se necesitan conocer los siguientes parámetros de la mina:

Tabla 2: Parámetros necesarios para el cálculo de Lane

Notación	Concepto	Unidad
M	Capacidad Mina	Mton/año
H	Capacidad Planta	Mton/año
K	Capacidad Mercado	Mton/año
m	Costo Mina	US\$/ton
h	Costo Procesamiento	US\$/ton
k	Costo Mercado (Selling Cost)	US\$/oz
f	Costos fijos	US\$/año
F	Costo de Oportunidad	US\$/ton
y	Recuperación	%
p	Precio	US\$/oz

Lane presenta el proceso completo de la operación minera a través de tres etapas, minería, procesamiento y comercialización, en donde la economía de cada etapa se identifica y se aísla para proporcionar un corte óptimo para cada etapa. Los puntos de intersección a lo largo de las curvas de valores actuales para cada etapa de una operación minera se utilizan para identificar las leyes de corte de equilibrio en los puntos donde la capacidad de las etapas de minería, procesamiento y comercialización se utiliza plenamente y se optimiza el valor presente neto de la operación.

Utilizando los parámetros de la tabla anterior, el valor presente de cada periodo corresponde a:

$$PV = (p - k) \cdot x \cdot y \cdot g_{media} - x \cdot h - m - (f + F) \cdot \tau$$

Ecuación 5: Valor Presente según los parámetros utilizados en el cálculo de Lane.

Donde:

x = Es la proporción de mineral sobre la ley de corte, la cual se deja constante en 1 para este caso

g_{media} = Es la ley media del mineral por sobre la ley de corte a analizar

τ = Corresponde a una variable que define la limitante de cada proceso, definido según cada etapa:

Si la mina es la limitante: $\tau = \frac{1}{M}$

Si la planta es la limitante: $\tau = \frac{x}{H}$

Si el mercado es el limitante: $\tau = \frac{x \cdot y \cdot g_{media}}{K}$

En ese sentido, la mejor manera de examinar las relaciones entre los límites en diferentes etapas de la operación minera es calcular y comparar el valor presente V para cada una de las restricciones. Con el valor presente en función de las reservas restantes se derivan las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_m &= (p - k) \cdot x \cdot y \cdot g_{media} - x \cdot h - m - \frac{(f + F)}{M} \\ V_h &= (p - k) \cdot x \cdot y \cdot g_{media} - x \cdot h - m - \frac{(f + F) \cdot x}{H} \\ V_k &= (p - k) \cdot x \cdot y \cdot g_{media} - x \cdot h - m - \frac{(f + F) \cdot x \cdot y \cdot g_{media}}{K} \end{aligned}$$

Ecuación 6: Valor presente (V) según limitante: mina, planta y mercado respectivamente.

Luego, para cada ley de corte a calcular se obtiene un valor presente mina, planta y mercado. Graficando estas tres representaciones del valor presente se obtienen curvas convexas con un único máximo, donde para cada ley de corte el valor seleccionado será el menor de las tres curvas, es decir, el valor que limita el negocio, así, el valor óptimo estará en el punto máximo de la curva que sea la mayor limitante (vale decir, “el máximo de los mínimos”), tal como se ve, a modo de ejemplo, en el siguiente gráfico:

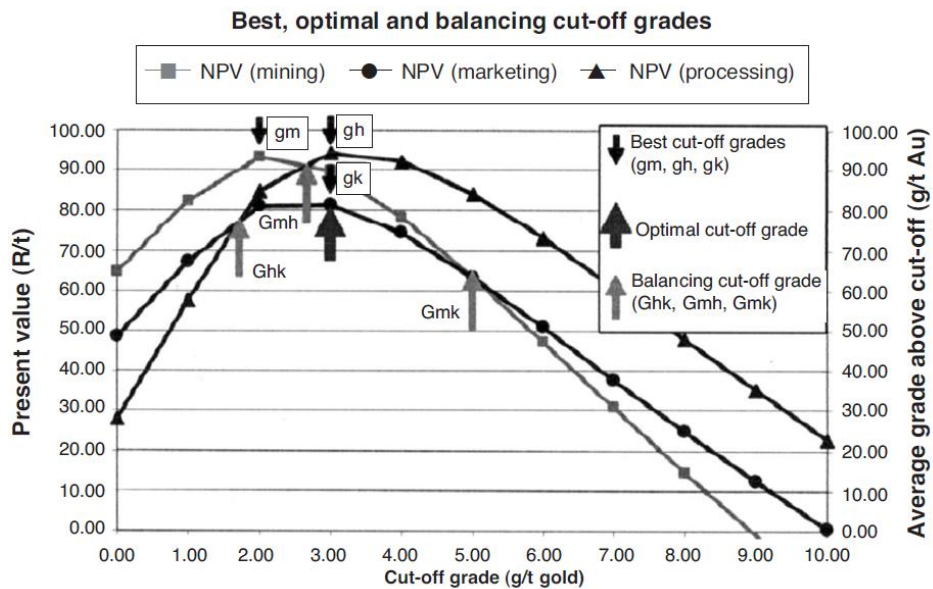


Gráfico 2: Ley de corte optima efectiva para las etapas de mina, procesamiento y mercado de una operación minera.

Desde este cálculo es posible, además, destacar los siguientes puntos:

- Después de tener en cuenta el costo de comercialización, el valor de la reserva mineral solo debe cubrir el costo variable del tratamiento para que contribuya a la operación minera. Esta es la definición más clara de mineral marginal que está disponible
- Ni el costo del tiempo ni los costos de desarrollo son relevantes.
- No hay referencia al valor presente; por lo tanto, una mina que está limitada por la capacidad minera debe ser operada tácticamente en lugar de estratégicamente. Esto significa que no importa cuál sea su política de calificación de ley corte actual, no hay forma de obtener ganancias ahora que se representen como pérdidas en el futuro, en palabras simples, no se tiene un costo de oportunidad involucrado. Cuando se ha tomado la decisión de continuar operando, no hay límite para la capacidad de tratamiento: debe aumentar la producción a medida que el precio sube. [6]

En conclusión, el método sugerido por Lane (1988, 1997) es una forma elegante y simple de optimizar las leyes de corte en las operaciones mineras donde las leyes son bajas y se puede aplicar una minería selectiva sobre una base estratégica. Esto proporciona al minero una herramienta táctica para maximizar el flujo de efectivo de la operación a escala local y año por año.

2.5.3 Determinación de una estrategia de ley de corte basado en un factor iterativo

Algunas investigaciones han desarrollado nuevas técnicas de optimización basadas en el algoritmo de K. Lane para determinar una política de ley de corte. La optimización de ley de corte es utilizada para derivar una estrategia operacional que maximice la ganancia de la mina. Donde la capacidad de mina lo permita, sacrificar material de baja ley durante las primeras etapas de la mina permite que se procese mineral que entregue altos flujos de caja.

Por ende, la política de ley de corte tiene una influencia significativa dentro de los resultados económicos de una operación minera. La determinación de una ley de corte que maximice el VAN esta ya constituida dentro de la industria.

Se ha observado que, a diferencia de la ley de corte de punto de equilibrio constante, las leyes de corte óptimas / dinámicas, que cambian debido al efecto declinante del VAN durante la vida útil de la mina, no solo respetan el precio del metal y los cash cost de las etapas de minería, planta y refinación, sino que también toman en cuenta las capacidades limitantes de estas etapas y la distribución del tonelaje de ley del depósito (Dagdelen 1992, Lane 1964). En otras palabras, las técnicas que determinan la ley de corte óptima considerar el costo de oportunidad de no recibir los flujos de efectivo futuros durante la vida de la mina debido a capacidades limitantes presentes en las etapas de la mina, procesamiento o refinería (Lane 1988). [7]

Optimizar las leyes de corte de la mina ha sido largamente investigado como medio para maximizar el VAN de proyectos mineros. En años recientes la teoría detrás de esta

optimización a la ley de corte ha sido extendida para que abarque con otras partes de la operación. Principalmente esto involucra optimizar el rendimiento y la recuperación de planta. Un molino puede operar con una alta tasa de rendimiento, sacrificando la recuperación, pero logrando altas tasas de producción de mineral. Tal como en una mina uno puede sacrificar las leyes más bajas con el fin de obtener flujos de caja mayores. Esta analogía sugiere que las herramientas desarrolladas para determinar la estrategia de ley de corte optima también deben ser utilizadas para encontrar una solución al problema de planta. Como son operaciones interdependientes, una no puede ser optimizada independiente de la otra.

La optimización de la ley de corte maximiza el VAN (NPV) de un proyecto sujeto a restricciones de capacidades de mina, planta y mercado. Esto usualmente se expresa anualmente como el tonelaje minado, el tonelaje procesado y la cantidad de producto vendido respectivamente. En cualquier momento, una, dos o todas las restricciones van a restringir totalmente al sistema. Por lo tanto, para obtener una correcta optimización de la ley de corte, las restricciones de capacidad deben ser independientes a esta (Wooler, 1999).

El algoritmo que ha sido desarrollado para encontrar la ley de corte optima usando un factor de optimización iterativo (σ_t), sustituyendo a f y F_i en el algoritmo de Lane original. Usando este nuevo factor el valor del VAN aumenta a lo largo de la vida de la mina.

Este factor se incluye dentro de la última ecuación de ley de corte, la cual considera además el costo mina (m) para maximizar el VAN del proyecto según la siguiente ecuación:

$$g_u(i) = \frac{c + m + \sigma_t}{(P - s)xy}$$

Ecuación 7: Ley de corte mina con factor iterativo

2.5.4 Procedimiento del Algoritmo

La ley de corte $g_m(i)$ depende del VAN, el cual no puede ser determinado hasta que se haya encontrado la ley de corte óptima. La solución a este tipo de problema de interdependencia se obtiene utilizando un enfoque iterativo.

En matemáticas, y en particular en funciones, la iteración es un proceso de evaluación repetitivo de una función. La misma operación matemática se realiza muchas veces usando como input el output de la iteración anterior. Generando muchas iteraciones el algoritmo debería ser capaz de determinar si el proceso converge o diverge.

Los pasos a seguir del algoritmo son los siguientes:

1. Leer los archivos de entrada (adjuntos en la Tabla 3)
 - ✓ Parámetros económicos (precio, costo de venta, capacidades, etc.)
 - ✓ Distribución de Tonelaje-Ley

Tabla 3: Parámetros de entrada para el cálculo de la ley de corte

Notación	Concepto	Unidad
I	Año	--
N	Vida de Mina	Años
p	Precio Metal	\$/oz
k	Costos de Venta	\$/oz
m	Costos Mina	\$/ton
h	Costo Procesamiento	\$/ton mineral
f	Costos fijos	\$/año
F	Costo de Oportunidad	\$/ton
y	Recuperación	%
d	Tasa de Descuento	%
M	Capacidad Mina	Mton/año
H	Capacidad Planta	Mton/año
K	Capacidad Refinamiento	Mton/año
Qm	Material Minado	ton/año
Qh	Mineral Procesado	ton/año
Qk	Concentrado Refinado	ton/año

2. Determinar una ley de corte $g_c(i)$ mediante la ecuación 1
(Como paso inicial, $V = VAN$ y el VAN inicial o $VAN(0) = 0$)
3. Computar el tonelaje de mineral (To) y el tonelaje de estéril (Tw) desde la curva de tonelaje ley del depósito:
 - ✓ El To y la ley g_c sobre la ley de corte $g_m(i)$
 - ✓ El Tw bajo la ley de corte $g_m(i)$
 - ✓ Además, calcular la tasa de *stripping* SR , donde $SR = Tw/To$

4. Se elige $Q_{ci}=C$, si T_0 es más grande que la capacidad de planta, si no, $Q_{ci}=T_0$. Además, se elige Q_{mi} como cantidad minada, siendo

$$Q_{mi} = Q_c \cdot (1 + SR) \quad \text{y} \quad Q_{ri} = Q_c \cdot g_{media} \cdot y$$

Ecuación 8: Cantidad minada (Q_{mi}) y Cantidad a refinar (Q_{ri})

5. Determinar las ganancias anuales mediante la siguiente ecuación:

$$P_i = (S_i - r) \cdot Q_{ri} - Q_{ci}(c_i + f) - m_i \cdot Q_{mi}$$

Ecuación 9: Cálculo de ganancias anuales

6. Ajustar las curvas de tonelaje ley del depósito restando las toneladas de mineral Q_{ci} de los intervalos con ley sobre la ley de corte $gm(i)$ y las toneladas de estéril $Q_{mi} - Q_{ci}$ desde los intervalos bajo la ley de corte en proporción tal que la distribución no cambie.
7. Chequeando, si Q_{ci} es menor que la capacidad de planta C , entonces la vida de la mina pasa a ser $N = i$ y se va al Paso 8, si no, se escoge como indicador del año $i = i+1$ y se vuelve al Paso 2.
8. Se calcula el incremental de los VANi (NPV_i) para los flujos de caja usando las ganancias P_i estimadas en el Paso 5 desde la i hasta la N mediante la siguiente ecuación:

$$NPV_i = \sum_{j=1}^N \frac{P_j}{(1 + d)^{j-i+1}}$$

Ecuación 10: Cálculo de VAN incremental

Desde el año $i=1$ hasta N donde N es el total de años de la mina.

9. Se compara el VANi calculado en el Paso 8 con la iteración previa. Si el VAN no converge, se vuelve al Paso 2 o se cambia el factor de optimización. Si converge, se detiene el algoritmo.

Capítulo 3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

La metodología de trabajo propuesta por el alumno memorista y aprobada tanto por el profesor guía como por la empresa consta de 6 grandes etapas, cada una con diferentes objetivos y subetapas tal y como se muestra a continuación en la siguiente figura:



Figura 5: Etapas de la metodología de trabajo

La metodología presenta esta forma cíclica debido a que en una primera instancia se debe realizar el análisis para encontrar una ley de corte equivalente, luego, con los datos provenientes de ese trabajo, se procederá a hacer el mismo trabajo, pero para obtener la ley de corte marginal y el análisis de marginalidad correspondiente.

3.1. Análisis Situación Actual (Reservas y COG)

En esta primera etapa la idea básica es tener entendimiento de cómo se maneja el concepto de reserva y el cálculo de ley de corte dentro de la faena, a modo de comprender la metodología actual y buscar opciones de mejora.

3.2. Cálculo de Recursos Económicamente Viables

En esta segunda etapa lo que se busca es poder calcular la cantidad efectiva de recursos económicamente viables dentro de cada sector estudiado. La forma de obtener esto es mediante una herramienta de Vulcan llamada “*Stope Optimiser*”, la cual permite calcular caserones (SMU como unidad básica de explotación) que contengan una ley media mayor a una ley de corte impuesta por el planificador y que además cumpla con parámetros de diseños correspondientes a los entregados por las superintendencias de Planificación y Geomecánica.

Cada uno de los sectores se diseñó dentro del *Stope Optimiser* en primera instancia para una ley de corte de 3.0. Luego, con lo remanente, se calculó para una ley de corte de 2.0 y finalmente mediante la misma metodología se realizó para una ley de corte de 1.0. Con esto, se obtienen categorizaciones de recursos con el respectivo tonelaje de mineral, leyes medias y onzas de finos tanto de oro como de plata. Finalmente, estos datos serán de utilidad para poder crear las curvas tonelaje ley que se utilizarán en etapas posteriores para realizar los flujos de caja iterados.

3.3. Resumen de costos y recuperaciones por sector y mineralogía

Como se mencionó anteriormente, El Peñón es un conjunto de sectores, con diferentes mineralogías, calidades de roca, métodos de explotación, distancias a planta, entre otras variables. Por lo tanto, no sería extraño que cada sector presente un costo mina y costo planta distinto asociado a dichas condiciones intrínsecas.

El objetivo de esta tercera etapa es la de calcular los costos por sector para tener una estructura de costos sólida que robustezca a la evaluación económica posterior. Para esto, se baja la información brindada por el área de Gestión Mina, Geología y Planta y se procede a realizar un cálculo según cada sector que se incluye dentro de la evaluación económica.

3.4. Evaluaciones por sector

Una vez obtenida la matriz de costos, es posible generar cálculos respecto al inventario de recursos económicamente viables de cada sector utilizando la metodología de Lane para obtener una ley de corte generada por esta metodología. Con esta primera aproximación es posible obtener un inventario de reservas la cual es necesario afinar en la evaluación final debido a que Lane no considera dentro de sus costos lo relacionado a los metros de drift, accesos y desarrollos que se deben realizar para extraer el mineral del macizo rocoso. Para materializar esta etapa, se crea una base de datos única con los diez sectores previamente mencionados respecto a las variables de categoría (medido, indicado, inferido y dilución), ley y onzas de oro, ley y onzas de plata, GEO (onzas de oro equivalente) y ley de oro equivalente. Es con esta última que se generan las curvas de tonelaje ley y las evaluaciones económicas para determinar si existen beneficios económicos positivos resultantes de la extracción de este mineral.

3.5. Realización de Iteraciones de Flujos de Caja

Teniendo una primera aproximación por Lane de la ley de corte, es necesario afinar este cálculo incluyendo otras variables o *inputs* que incorporen conceptos de temporalidad, accesos, desarrollos y criterios del planificador. Es por esto que desde las curvas tonelaje ley generadas en la etapa anterior, se obtienen los datos respecto a tonelaje, onzas y leyes de oro, plata y oro equivalente de cada sector. Desde la estadística del año 2017 respecto a las toneladas de mineral que se generan por metro desarrollado y así a su vez las toneladas de estéril se generan tres KPI's de toneladas de mineral por metro de drift, de accesos y de desarrollo respectivamente. Los cuales a su vez involucran costos de Capex y metros que no se incluyeron dentro de la aproximación primaria por Lane.

Queda a criterio del planificador el introducir un rango de iteración de la ley de corte y criterios para realizar el ranking de sectores, es decir, criterios que permitan decidir el secuenciamiento de la extracción de los sectores generando así un Plan Mina. Esto a su vez entrega distintos valores de VAN en los cálculos iterativos de flujos de caja, obteniendo así un VAN óptimo que a su vez tiene asociado una ley de corte óptima. En esta etapa además se pueden analizar las diferencias que presentan los distintos rankings que se consideren para generar los distintos planes de secuenciamiento.

Por último, se calcula el flujo de caja de cada sector en particular (utilizando un plan mina como si fuera el único que se extrae de esta) y se itera cada una de las leyes de corte obteniendo el óptima de cada uno de los sectores, analizando así las diferencias entre utilizar los óptimos locales de cada sector o el óptimo global ponderado por las toneladas de mineral.

El resumen de estas etapas de la metodología se puede ver en la siguiente figura:

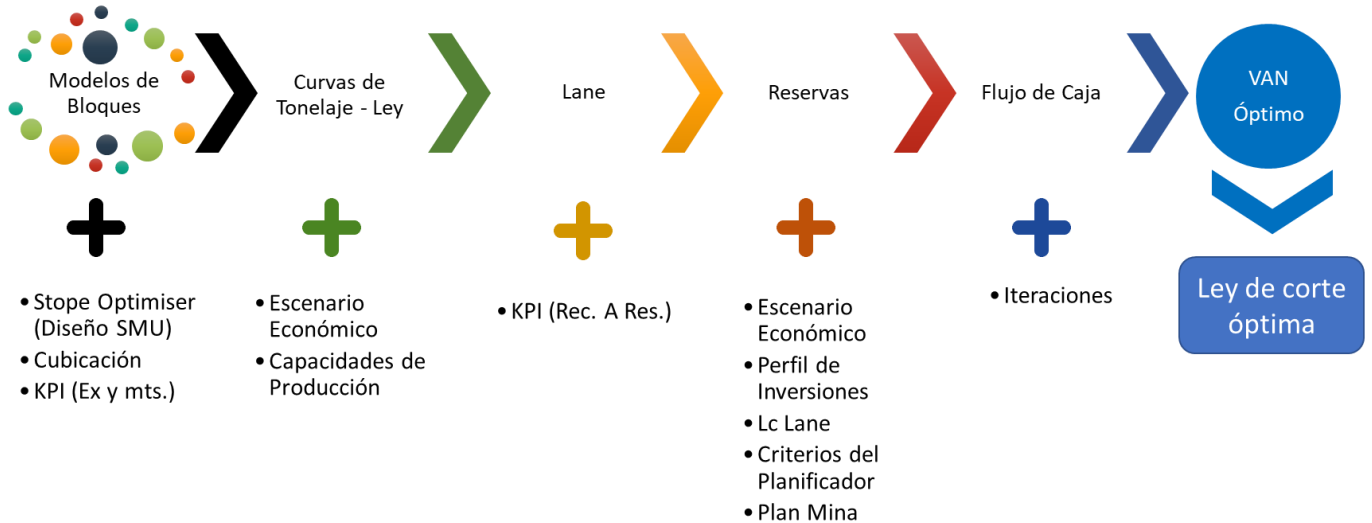


Figura 6: Inputs necesarios para realizar el cálculo de los flujos de caja.

3.6. Toma de Decisiones y Conclusiones

En esta etapa se analizan los escenarios con y sin el análisis de marginalidad, que presenten algún tipo de mejora respecto al caso base actual, para que finalmente se concluya por parte del área de Planificación cuál será en el corto, mediano y largo plazo la ley de corte óptima que deban utilizar.

Capítulo 4 DESARROLLO

Previo a la presentación de los resultados obtenidos en esta memoria profesional, es importante recalcar que los resultados mostrados en esta sección presentan un factor multiplicativo debido a que los resultados originales son confidenciales para la corporación.

4.1. Reservas y COG Actual

Según la categorización de recursos y reservas usada en El Peñón, se presenta un resumen 2017 (utilizable para el año 2018) de reservas de oro y plata según cada uno de los sectores activos de la mina. Al ser reservas, estas se dividen en probadas y probables, incluyen la dilución operacional y van asociadas a una ley de corte.

Dicha ley de corte se calcula de manera global según bloques, siendo el único factor distinto el costo de transporte adicional a planta, el cual es 0 para todos los bloques excepto para el de FODO y PAV. Los parámetros utilizados son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4: Parámetros para la evaluación económica Peñón 2017

Parámetro	Valor	Unidad
Costo Mina	109.5	US\$/ton
Costo Estéril	43.8	US\$/ton
Costo Planta	34.2	US\$/ton
G&A	20.4	US\$/ton
Costo Tpte.	4.83	US\$/ton
RM Au	94	%
RM Ag	87	%
P Au	1250	US\$/oz
P Ag	18	US\$/oz
S Au	20.2	US\$/oz
S Ag	0.3	US\$/oz

Con estos parámetros, utilizando la ecuación 2, se obtiene una ley de corte equivalente (COG) de 4.35 g/ton para los sectores que presentan un coste de transporte adicional a planta nulo y de 4.49 g/ton para el sector de Fortuna. Sin embargo, a modo general, la Superintendencia de Planificación y Desarrollo utiliza una ley de corte equivalente de 4.0 g/ton global para realizar una evaluación económica asociada a esta ley de corte.

De manera análoga, utilizando la ecuación 3, se obtiene una ley de corte marginal de 2.07 g/ton para los sectores que presentan un coste de transporte adicional a planta nulo y de 2.20 g/ton para el sector de Fortuna y la Superintendencia utiliza una ley de corte marginal de 2.0 g/ton.

4.2. Resumen de Costos y Mineralogía por sector

Como se puede ver en las etapas anteriores, los cálculos de reservas han sido realizados mediante costos y recuperaciones metalúrgicas globales, no considerando las diferencias intrínsecas que se presentan entre cada sector respecto a mineralogía, a calidad de roca, a necesidad de relleno y fortificación, al costo en transporte hasta la planta, entre otros. Por otro lado, para calcular la ley de corte según el factor iterativo basado en el trabajo realizado por K. Lane es necesario conocer las capacidades mina y planta reales de cada sector y los costos fijos. Respecto al costo de oportunidad, debido a que no se considera una segunda opción dentro de este cálculo, se anula su valor quedando fuera del estudio.

Para este caso, los costos reales por sector se obtuvieron con el área de Gestión Mina, las recuperaciones metalúrgicas con el área de Geología y las capacidades reales de mina y planta con el área de Operaciones. Resumiendo, se obtienen los siguientes resultados:

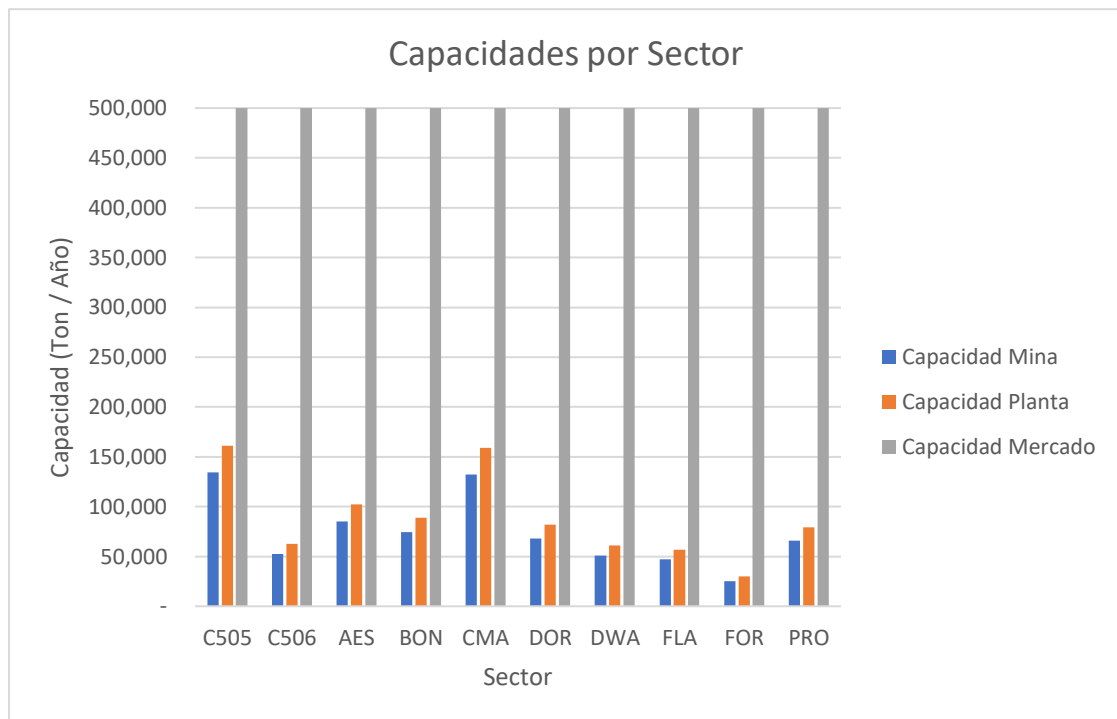


Gráfico 3: Capacidades Mina, Planta y Mercado de cada sector

Del gráfico 3 es importante destacar que, como se mencionó en la sección de Alcances, la capacidad de mercado se deja libre del estudio, utilizando un valor uniforme de 0.5 Mton/año. Para cada uno de los sectores, la capacidad mina se ve limitada por la cantidad de equipos mina que existen en cada bloque y por la cantidad de frente activas que presentan según la estadística del 2017. Por otro lado, la capacidad planta se ve limitada respecto a las mineralogías que presenta cada sector y los requerimientos de mineralogía que cada blending debe tener para alimentar a la planta.

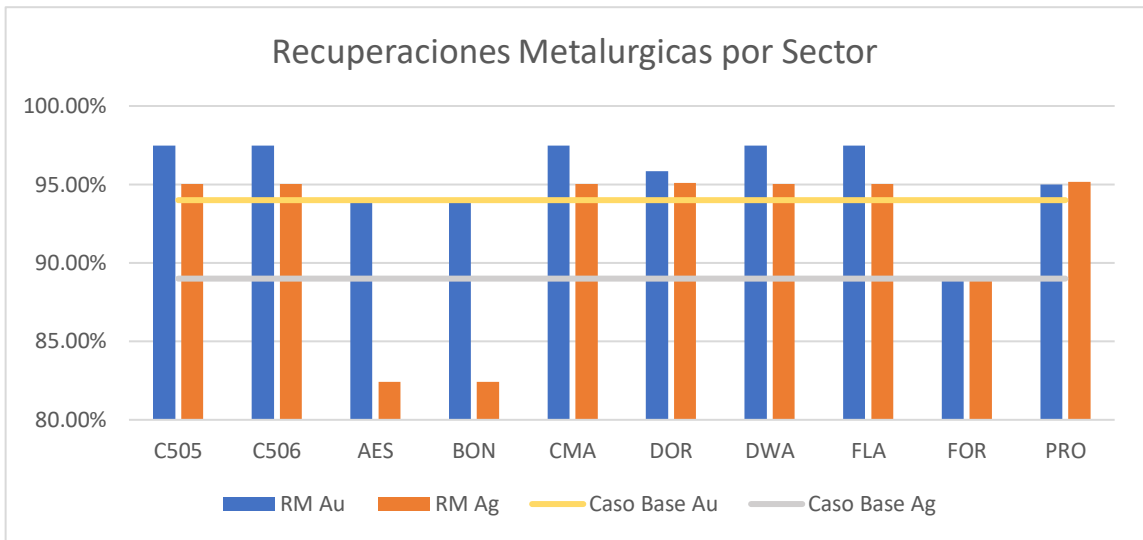


Gráfico 4: Recuperaciones metalúrgicas de Au y Ag por sector



Gráfico 5: Costo Mina por sector comparado con el caso base.

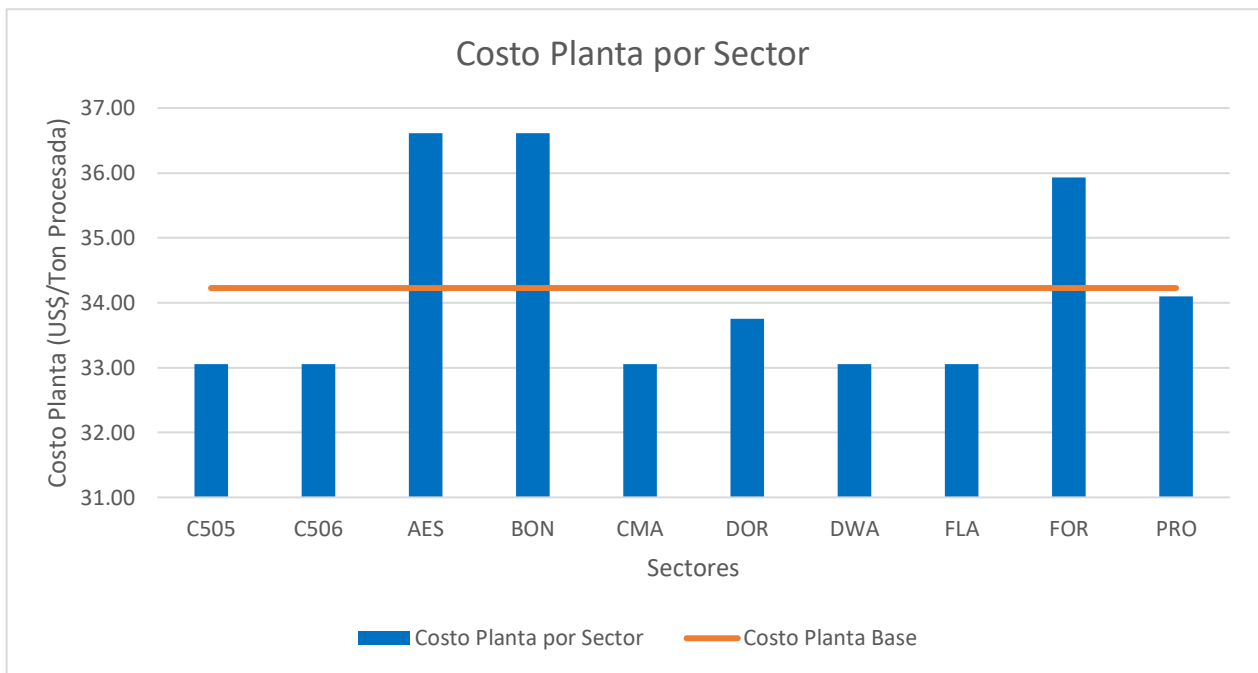


Gráfico 6: Costo Planta por sector comparado con el caso base.

Las principales diferencias se obtienen dentro de los costos de fortificación y transporte para el caso del costo mina y dentro del consumo de insumos para el caso del costo planta. Estas diferencias se pueden observar gráficamente en la sección de Anexos.

4.3. Evaluación Económica

Al realizar los diseños de las SMU en *Stope Optimiser* y cubicándolas en la herramienta *Advances Reserves Editor* de Vulcan, se obtienen bases de datos que poseen variables como el tonelaje, ley y onzas de oro, ley y onzas de plata con lo que se puede realizar el cálculo de ley y onzas en oro equivalente. Con los parámetros por sector es posible realizar curvas de tonelaje ley por sector y realizar el cálculo de Lane para obtener la ley de corte Lane a utilizar para el cálculo del flujo de caja.

4.3.1. Curvas de Tonelaje Ley por Sector

Para el cálculo de las curvas de tonelaje ley por sector fue necesario modelar el comportamiento de las toneladas de estéril ya que, por estadística real mina, se sabe que dentro de El Peñón a mayor ley de corte el estéril asociado aumenta en proporción al mineral. Por lo tanto, para poder realizarlo, en una primera medida se tomó como referencia los

metros de drift, accesos y desarrollos que se extrajeron durante el año 2017 a una ley de corte de 4.0 g/ton en cada uno de los sectores analizados y se dividieron por la capacidad mina anual de cada uno, obteniendo así los siguientes tres KPI's por sector: [8]

Tabla 5: KPI de los metros en función de las toneladas de mineral de cada sector.

Sector	KPI a Lc = 4.0 g/ton		
	Drift/Tmx	Acceso/Tmx	Desarrollo/Tmx
C505	1.15.E-02	4.75.E-03	5.90.E-03
C506	1.43.E-02	5.06.E-03	9.69.E-03
AES	3.40.E-02	5.62.E-03	3.81.E-03
BON	1.74.E-02	2.22.E-03	9.56.E-03
CMA	1.26.E-02	9.14.E-03	2.70.E-03
DWA	2.52.E-02	1.62.E-02	5.42.E-03
DOR	1.08.E-02	8.33.E-03	1.41.E-03
FLA	2.43.E-02	7.46.E-03	9.56.E-03
FOR	2.42.E-02	7.44.E-03	9.53.E-03
PRO	2.43.E-02	7.47.E-03	9.57.E-03

Una vez obtenido el KPI, es necesario realizar un ajuste ya que, si sigue netamente el comportamiento de las toneladas de mineral para cada ley de corte, entonces las toneladas de estéril seguirán el mismo comportamiento que las toneladas de mineral y el cálculo de Lane entregará que el resultado óptimo se encuentra dentro de las leyes más altas. Por lo tanto, se utilizará un KPI modificado según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \text{Metros}_{\text{Drift}} &= \text{Ton } Mx_{KPI\ 4.0} * \left(1 + \frac{1}{\ln(Lc + Lc_{KPI\ 4.0} + m)} + c \right) * KPI_{\text{Drift}} \\
 \text{Metros}_{\text{Acceso}} &= \text{Ton } Mx_{KPI\ 4.0} * \left(1 + \frac{1}{\ln(Lc + Lc_{KPI\ 4.0} + m)} + c \right) * KPI_{\text{Acceso}} \\
 \text{Metros}_{\text{Desarrollo}} &= \text{Ton } Mx_{KPI\ 4.0} * \left(1 + \frac{1}{\ln(Lc + Lc_{KPI\ 4.0} + m)} + c \right) * KPI_{\text{Desarrollo}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 11: Metros de Drift, Accesos y Desarrollos modelados según KPI

Las ecuaciones anteriores indican que, al KPI original, se le multiplica una función logarítmica que presenta 4 factores principales:

- L_c = Corresponde a la ley de corte de cada uno de los datos a tabular dentro de la curva de tonelaje ley (desde 0.01 a 10 g/ton con un incremento de 0.1 g/ton).
- $L_{KPI_{4.0}}$ = Corresponde a la ley de corte utilizada para el cálculo del KPI original, es decir, es igual a 4.0 g/ton.
- m = corresponde a un valor de ajuste de la pendiente de la curva de las toneladas de estéril, toma un valor de 0.1 g/ton.
- c = Corresponde a un valor de ajuste del corte en el eje Y de la curva de las toneladas de estéril, toma valores entre -0.8 y 0.2.

Por último, se agrega como factor multiplicativo a las toneladas de mineral de cada sector con las que se calcularon los KPI's originales, es decir, las toneladas de mineral que existen por sobre una ley de corte de 4.0 g/ton. Con esto, solo basta conocer las dimensiones de cada labor para modelar en base a estos datos las toneladas de estéril, la cual en el caso del drift corresponde a 2 metros de ancho (siendo los otros 2 metros correspondientes a mineral) y 4 metros de alto, secciones de 4m x 4m para los accesos y secciones de 4.3 m x 4.5 m para los desarrollos, todos con una densidad de 2.40 ton/m³. Con esto, las toneladas de estéril quedan definidas como:

$$Ton_{esteril} = (Metros_{Drift} \cdot 2 \cdot 4 + Metros_{Accesos} \cdot 4 \cdot 4 + Metros_{Desarrollos} \cdot 4.3 \cdot 4.5) \cdot 2.4$$

Ecuación 12: Toneladas de Estéril en función de los metros de Drift, Accesos y Desarrollo

Cabe destacar que, para el análisis de marginalidad, el estéril modelado será mucho menor ya que no se consideran metros de accesos ni metros de desarrollo a realizar, siendo así estos dos KPI's iguales a 0 para todos los sectores. Por lo tanto, todo el estéril que se retire en este análisis estará asociado solo al desarrollo de los drifts que presenten leyes incrementales.

Así, con la herramienta creada, es posible obtener las siguientes curvas de tonelaje y ley para cada uno de los sectores analizados:

4.3.1.1. Caserón 505

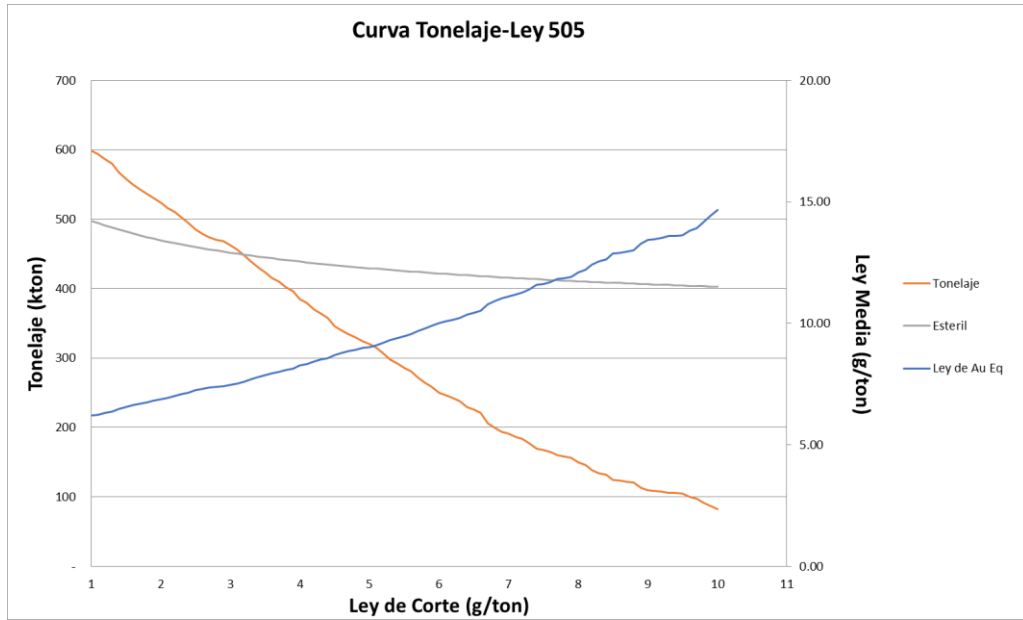


Gráfico 7: Curva Ton-Ley sector caserón 505

4.3.1.2. Caserón 506

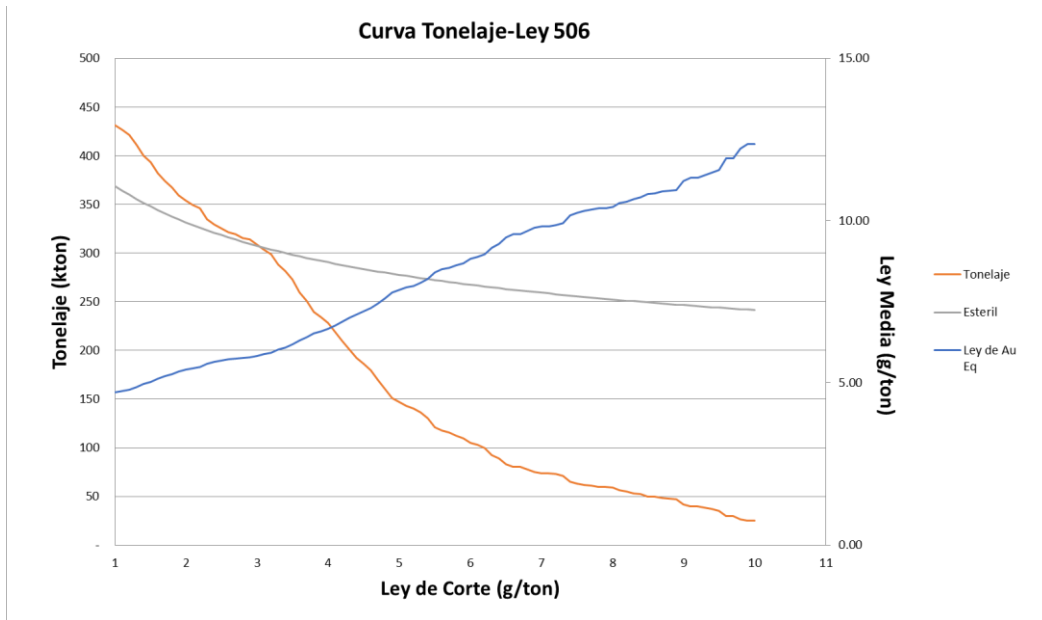


Gráfico 8: Curva Ton-Ley sector caserón 506.

4.3.1.3. Al Este

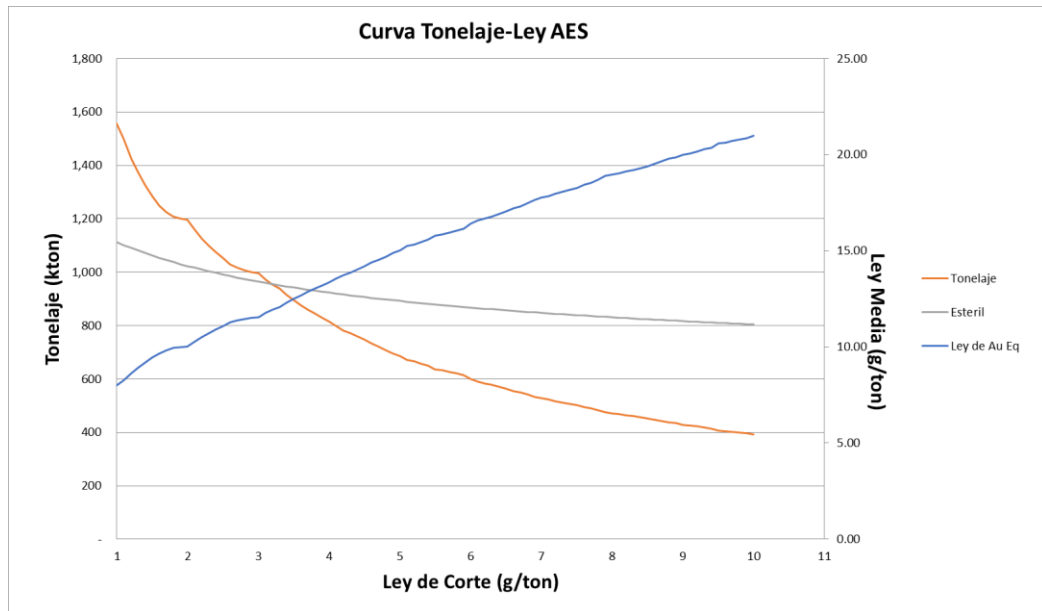


Gráfico 9: Curva Ton-Ley sector Al Este.

4.3.1.4. Bonanza

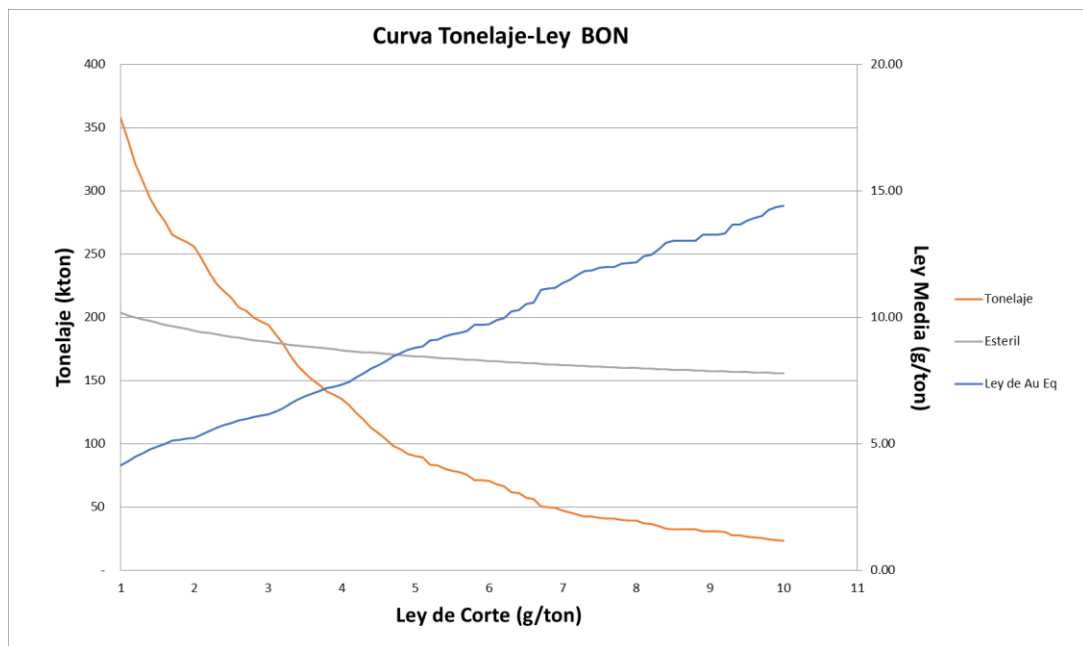


Gráfico 10: Curva Ton-Ley sector Bonanza.

4.3.1.5. Cerro Martillo

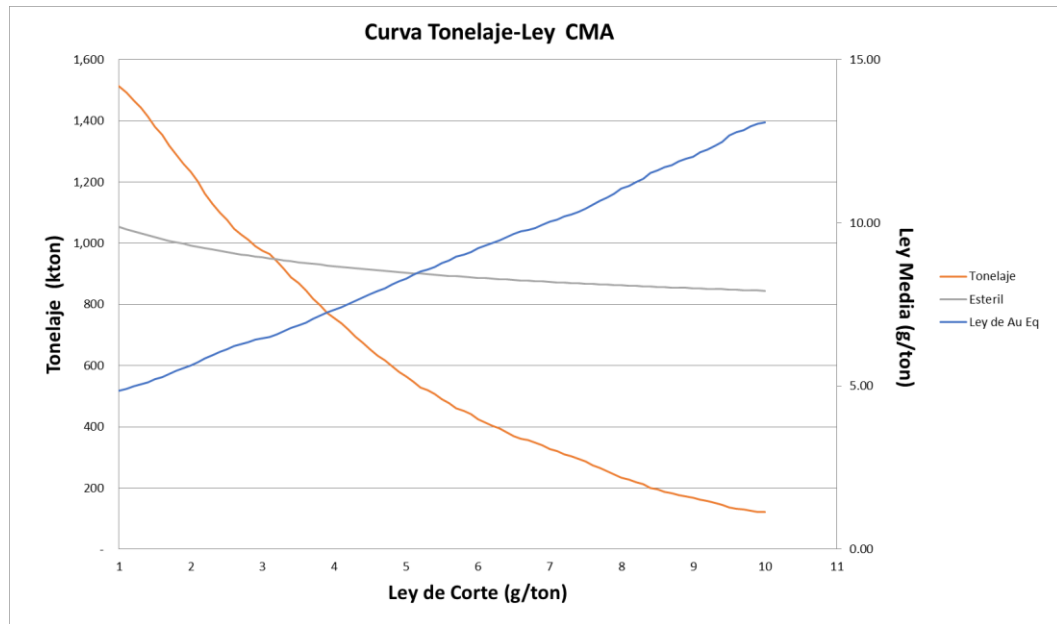


Gráfico 11: Curva Ton-Ley sector Cerro Martillo.

4.3.1.6. Dorada

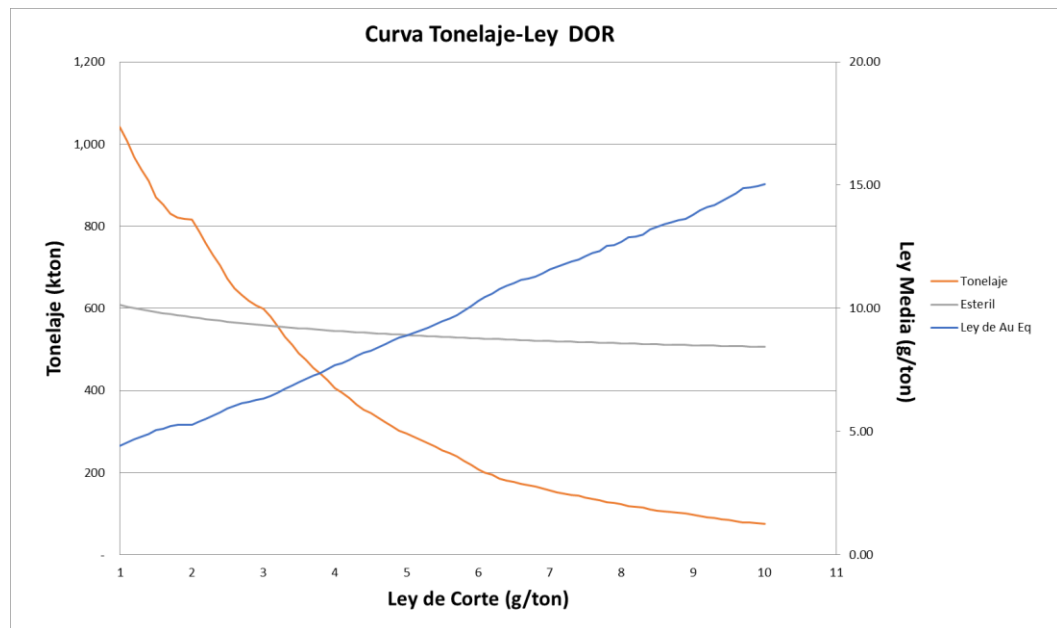


Gráfico 12: Curva Ton-Ley sector Dorada.

4.3.1.7. Discovery Wash

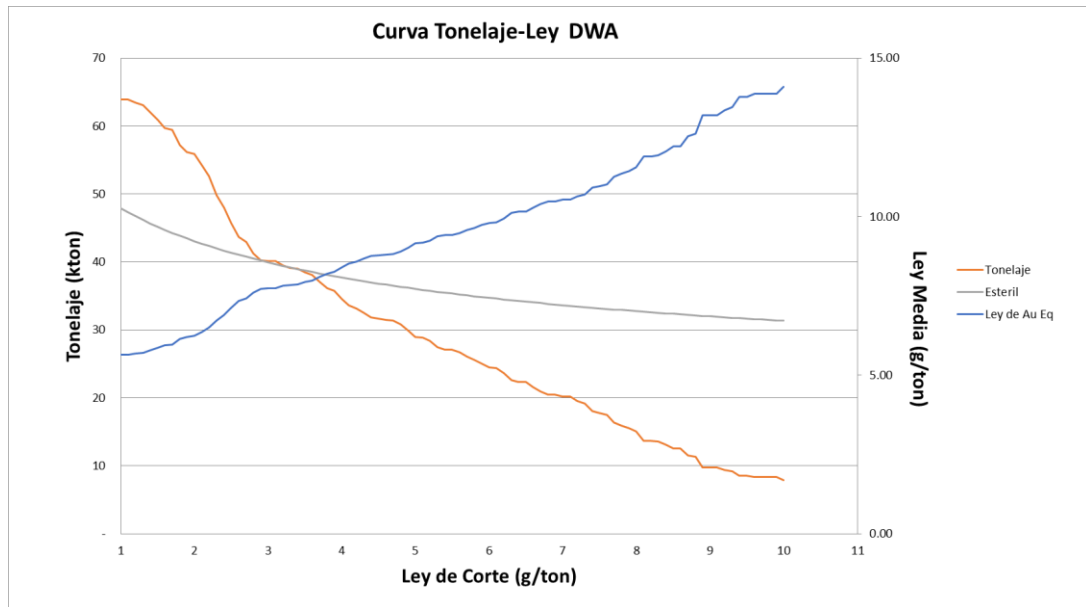


Gráfico 13: Curva Ton-Ley sector Discovery Wash.

4.3.1.8. Fortuna

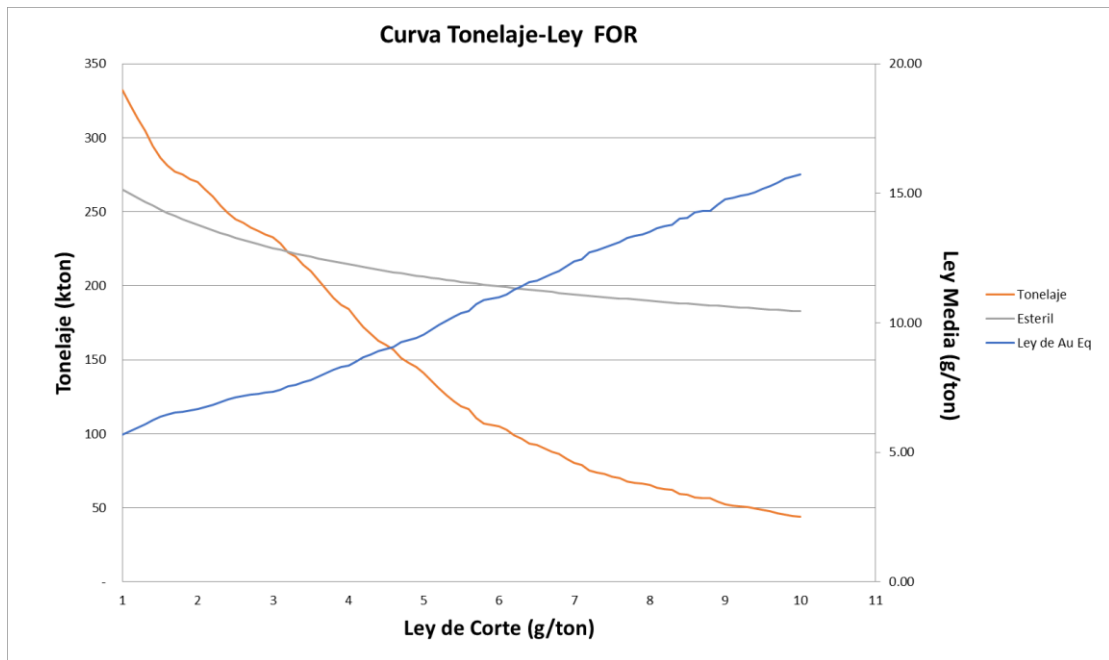


Gráfico 14: Curva Ton-Ley sector Fortuna.

4.3.1.9. Martillo Flats

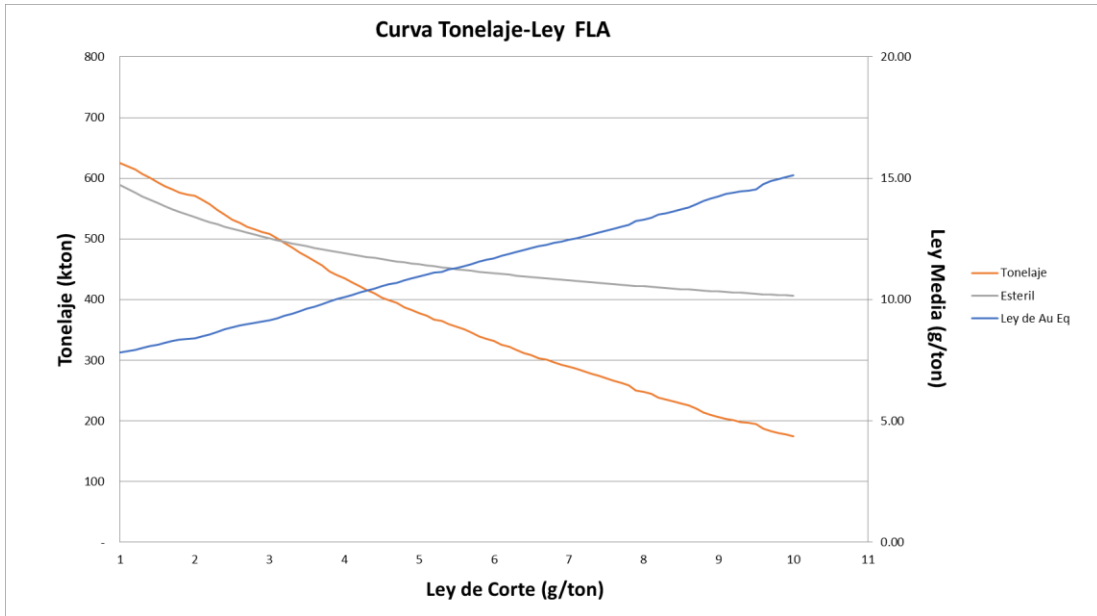


Gráfico 15: Curva Ton-Ley sector Martillo Flats.

4.3.1.10. Providencia

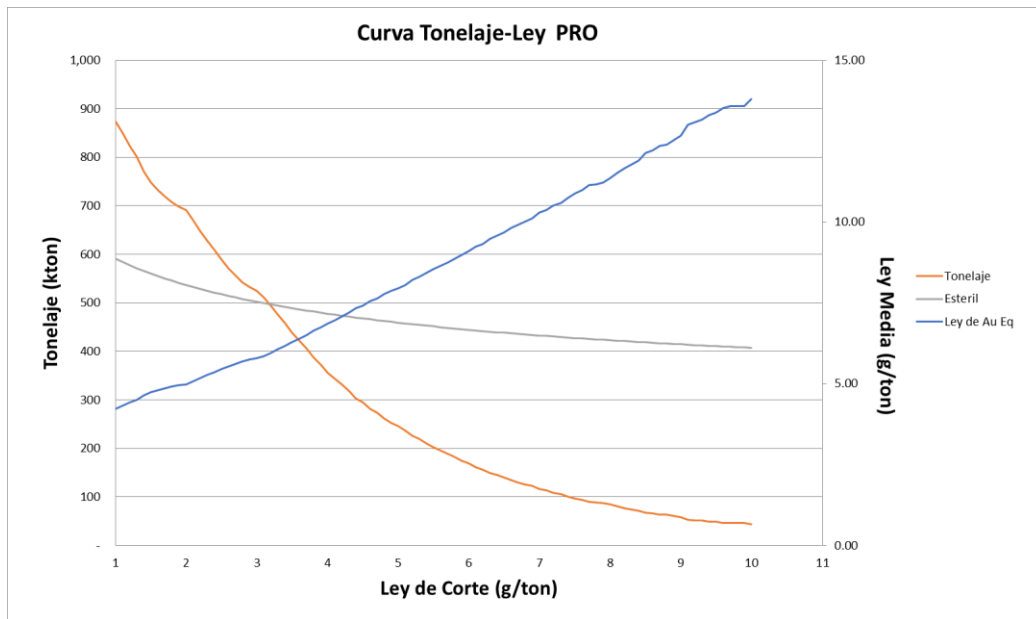


Gráfico 16: Curva Ton-Ley sector Providencia.

4.3.1.11. Todos los sectores

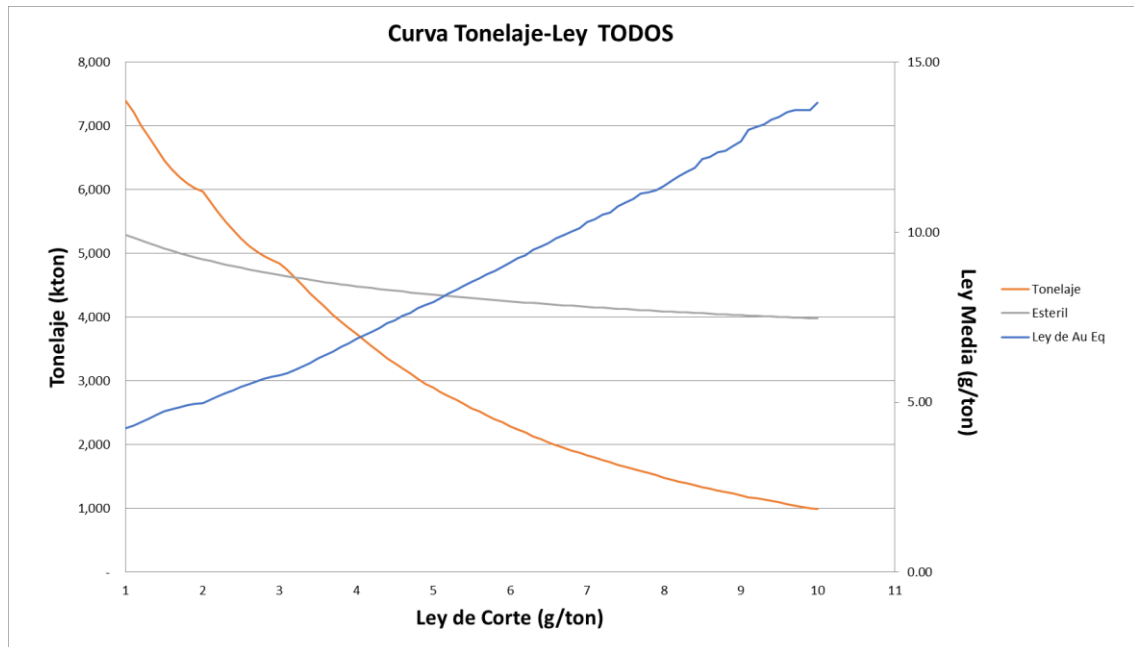


Gráfico 17: Curva Ton-Ley de todos los sectores combinados.

4.3.2. Ley óptima según Lane para cada sector

Utilizando la metodología de Lane es posible obtener la ley de corte utilizando los parámetros previamente mostrados, esta ley de corte va asociada a una cantidad de toneladas de mineral, de estéril, onzas de Au y Ag, leyes medias de Au y Ag y metros de drift, accesos y desarrollos.

En particular, para poder obtener una ley global representativa del tamaño que tiene cada uno de los sectores, se decidió ponderar por las toneladas de mineral dando así un valor de 4.529 g/ton, este valor, si bien baja, no contrasta en demasía con el valor de la ley de corte por Lane si se consideran todos los sectores como un gran caserón como se muestra en la curva de tonelaje ley de todos los sectores, la cual es de 4.6 g/ton.

Los resultados de cada uno de los sectores junto con la ley de corte ponderada se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 6: Ley de corte según Lane y toneladas de mineral asociadas, junto a la ley de corte global por Lane.

Sector	Lc Lane (g/ton)	Ton de Mx (Ton)
C505	4.4	528,865
C506	4.4	340,810
AES	4.8	1,055,539
BON	4.6	182,493
CMA	4.4	1,085,941
DOR	4.4	613,030
DWA	4.5	47,598
FLA	4.6	570,084
FOR	5	230,388
PRO	4.5	528,399
Lc Ponderada Global (g/ton)		4.529
TODOS	4.6	5,046,987

Con estos valores es posible analizar que existe una relación directa entre la ley de corte y el costo mina de cada sector. Por lo tanto, es simple inferir que estos sectores deben entonces presentar leyes altas de mineral y/o baja REM para que el óptimo se encuentre en leyes de corte más bajas. Por otro lado, las diferencias entre la ley de corte ponderada y la ley de “TODOS” corresponde a que en el primero se analiza la situación sector por sector, utilizando sus costos, leyes y KPI’s característicos mientras que en el segundo se utiliza todo como un gran caserón promediando todos los parámetros anteriormente nombrados.

4.3.3. Ley de corte marginal según Lane para cada sector

Para realizar este cálculo se debe ocupar la ecuación de ley de corte marginal en donde solo algunos costos deben ser modificados o descartados, dentro de ellos el costo mina baja a un valor promedio de 63 US\$/ton mx, el costo de G&A se considera nulo y, como se mencionó en la sección anterior, no se considera construcción ni de metros de desarrollo ni de accesos, por lo que las toneladas de estéril disminuyen considerablemente. Para este caso, se obtienen las siguientes leyes de corte marginales por sector:

Tabla 7: Ley de corte marginal según Lane.

Sector	Lc Lane (g/ton)
C505	2.1
C506	2.1
AES	2.5
BON	2.3
CMA	2.1
DOR	2.5
DWA	2.1
FLA	2.5
FOR	2.5
PRO	2.3
Lc Marginal Ponderada(g/ton)	2.32
TODOS	2.1

4.3.4. Criterios del Planificador

Dentro de los criterios que se consideran propios del planificador existen dos fundamentales, correspondientes al rango de iteración a utilizar y al realizar un ranking de sectores que determinen la secuencia de extracción. El primero es fácil de determinar debido a que es posible utilizar un rango amplio para asegurar la obtención del máximo global, pero toma mucho más tiempo de cálculo, por lo que para obtener un resultado confiable se utiliza generalmente un rango de ± 2.0 g/ton respecto a la ley de corte obtenida por Lane para asegurar la obtención del máximo.

De todas maneras, la herramienta de cálculo permite introducir el valor mínimo y el valor máximo del intervalo que el planificador estime conveniente, para cada caso, que asegure la obtención del máximo.

El segundo criterio presenta un poco más de complejidad debido a que existe una gran cantidad de factores que se pueden considerar para realizar un ranking del secuenciamiento de los sectores. En particular para este estudio, se utilizaron los siguientes cuatro rankings:

1. Onzas de oro por cada metro de drift, acceso y desarrollo
2. Onzas de oro equivalente (GEO) por cada metro de drift, acceso y desarrollo
3. Ley de Au
4. Ley de Au Equivalente

Es importante destacar que dentro de la Superintendencia de Planificación es el ranking N° 1 el que se utiliza para generar el Plan Mina de El Peñón. Además, es posible incluir más rankings con distintos criterios dentro de la herramienta para poder generar distintos secuenciamientos.

A continuación, se presentan como se ordenan los sectores según cada uno de los rankings a utilizar:

Tabla 8: Sectores ordenados según cada uno de los 4 rankings a utilizar.

		Sectores									
Criterio		C505	AES	BON	C506	DWA	FLA	CMA	PRO	FOR	DOR
Rankings	Onzas de Au/Metro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	GEOs/Metro	3	1	7	9	4	2	6	8	5	10
	Ley Au	2	1	4	6	5	3	7	9	10	8
	Ley Au Eq	5	1	8	10	4	2	7	9	6	3

Con la tabla anterior, queda claro que los sectores Al Este y Caserón 505 son los que presentan mejores condiciones ya que tienden a ocupar posiciones superiores dentro de cada uno de los cuatro rankings, en cambio, los sectores de Providencia, Dorada y Fortuna son los que tienden a ocupar los últimos lugares y por lo tanto tienden ser los sectores menos atractivos.

Datos que también se pueden extrapolar respecto a esta tabla es que los sectores de Dorada y Caserón 506 presentan altas leyes de Ag ya que su ranking sube al secuenciar por Ley de Au Equivalente en desmedro de solo secuenciar por Ley de Au.

4.4. Iteraciones de los Flujos de Caja utilizando óptimo global ponderado

Obtenidos ya la ley de corte global según Lane, los metros modelados matemáticamente, las toneladas de estéril asociadas a estos y los criterios del planificador, es posible generar los flujos de caja en base a cada uno de los secuenciamientos. Dichos flujos de caja presentan cálculos simplificados, calculando el beneficio mensual según la ecuación 1 y calculando el Valor Actualizado Neto (VAN) como la suma de todos los beneficios mensuales depreciados en el tiempo mediante una tasa de descuento mensual de un 0.4074% (equivalente a una tasa del 5% anual, utilizada típicamente en minas de oro y plata).

No se consideraron dentro de este cálculo conceptos típicos del flujo de caja como son las amortizaciones, depreciaciones, intereses, impuestos, royalties, capital de trabajo y valor residual. Luego, los ingresos dentro de estos flujos de caja quedan determinados por la siguiente ecuación:

$$\text{Ingresos [MUS\$]} = \text{Onzas de Au Producidas} \cdot (\text{Precio}_{Au} - \text{Selling Cost}_{Au}) + \text{Onzas de Ag Producidas} \cdot (\text{Precio}_{Ag} - \text{Selling Cost}_{Ag})$$

Ecuación 13: Cálculo de Ingresos dentro del Flujo de Caja

A su vez, los costos incluidos dentro del cálculo de flujo de caja se detallan en la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Costos [MUS\$]} = & \text{Ton}_{Mx} \cdot \text{Costo}_{Mina} + \text{Ton}_{ex} \cdot \text{Costo}_{Esteril} + \text{Ton}_{a\text{ planta}} \cdot \text{Costo}_{planta} \\ & + \text{Metros}_{Drift} \cdot \text{Costo}_{Drift} + \text{Metros}_{Accesos} \cdot \text{Costo}_{Accesos} + \text{Metros}_{Desarrollos} \\ & \cdot \text{Costo}_{Desarrollo} + \text{Ton}_{Mina} \cdot \text{Costo}_{Transporte} + \text{Costos Fijos (G\&A)} \end{aligned}$$

Ecuación 14: Cálculo de Costos dentro del Flujo de Caja

En donde:

$$\text{Ton}_{a\text{ planta}} = \text{Ton}_{Mx} \cdot \text{Recuperacion Mina}$$

$$\text{Ton}_{Mina} = \text{Ton}_{Mx} + \text{Ton}_{Ex}$$

$$\text{Costo}_{Drift} = 2,500 \frac{\text{US\$}}{m}$$

$$\text{Costo}_{Accesos} = 3,000 \frac{\text{US\$}}{m}$$

$$\text{Costo}_{Desarrollos} = 3,500 \frac{\text{US\$}}{m}$$

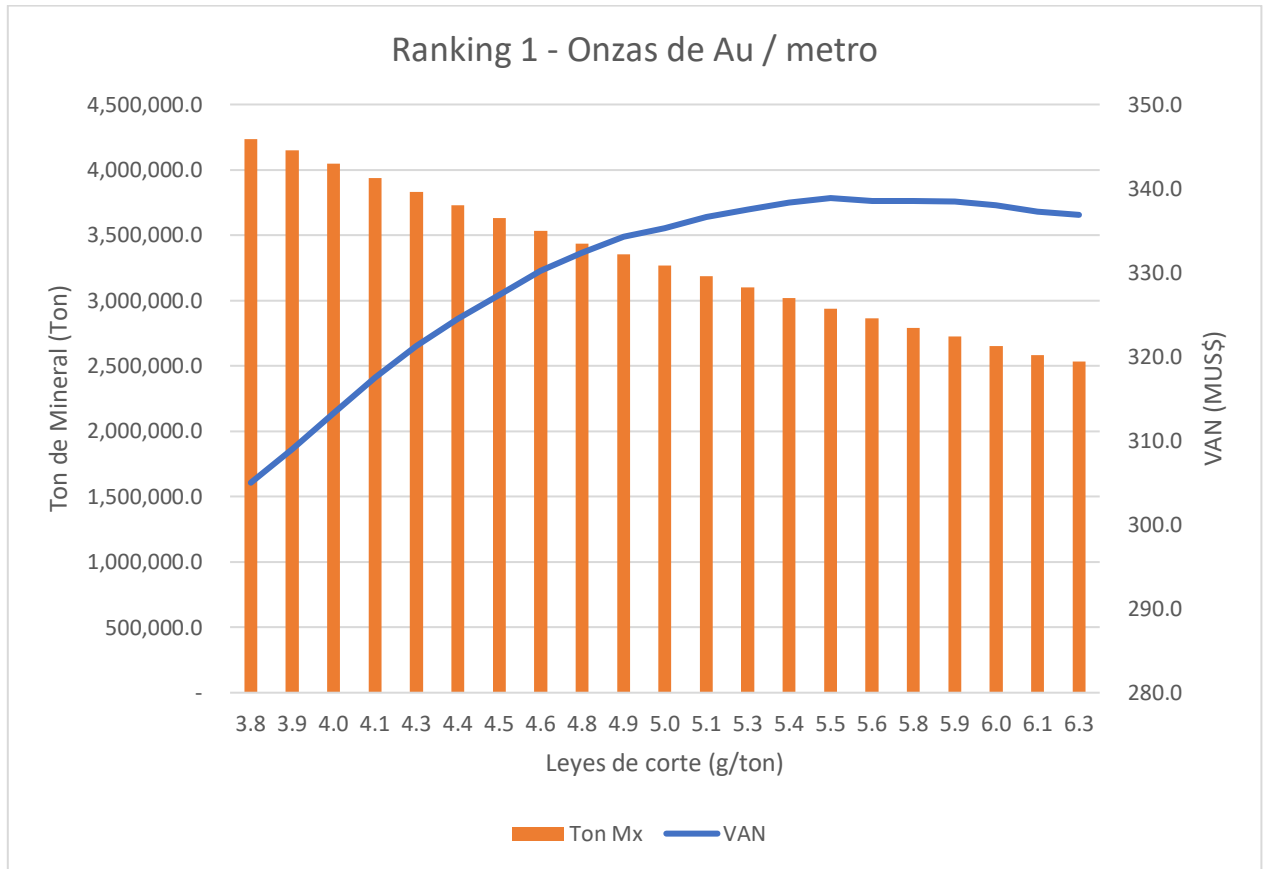
Con esto, es posible evaluar económicamente los secuenciamientos que se generan a través de cada uno de los rankings establecidos, en donde la capacidad mensual de producción siempre estará limitada por la capacidad mina de extracción. Estableciendo además un perfil de inicio de producción o *ramp-up* de 12 meses, empezando con un 35% de la producción en régimen.

Otro punto importante es que se utilizó un factor de conversión basado en estadística histórica del Peñón que considera lo que se obtuvo como recurso del *Stope Optimiser* versus lo que se obtiene realmente como reserva dentro del Plan Mina (descartando inviables), el cual tiene un valor promedio de un 70% para los sectores analizados.

Con esto, los resultados que se obtienen son curvas de VAN en función de la ley de corte, por ranking, utilizando en primera instancia una ley de corte global ponderada calculada en el punto 4.3.2, tal y como se muestran en los siguientes 4 gráficos:

4.4.1. Ranking 1 – Onzas de oro por cada metro de drift, acceso y desarrollo

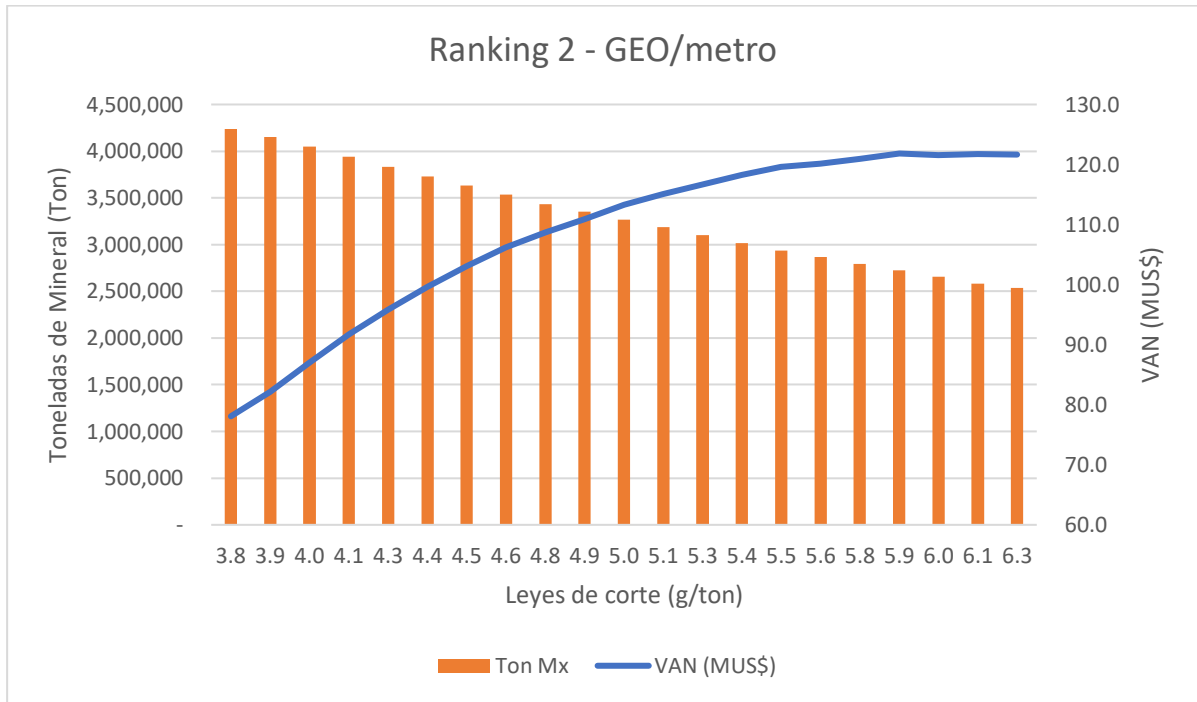
Tabla 9: Curva de VAN en función de la ley de corte para el primer ranking.



Para este ranking, el VAN óptimo es de 339 MUS\$ a una ley de corte óptima de 5.5 g/ton considerando solo los 10 sectores de análisis previamente mencionados. Comparando el resultado que entrega el mismo análisis para la ley de corte actual de 4.0 g/ton, se obtiene una diferencia en el VAN de 25.59 MUS\$ a favor.

4.4.2. Ranking 2 – GEO por cada metro de drift, acceso y desarrollo

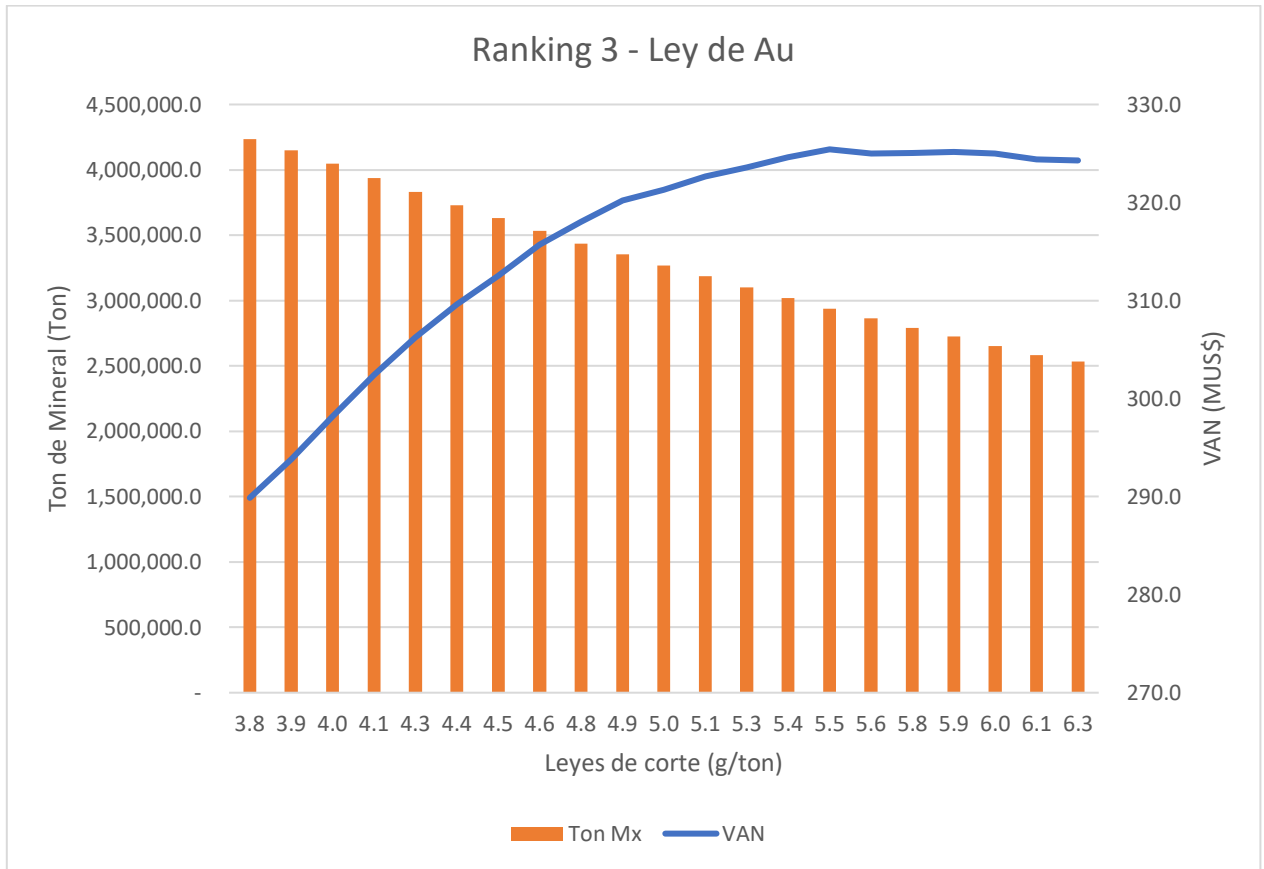
Tabla 10: Curva de VAN en función de la ley de corte para el segundo ranking.



Para este ranking, el VAN óptimo es de 352 MUS\$ a una ley de corte óptima de 5.4 g/ton. Comparando el resultado que entrega el mismo análisis para la ley de corte actual de 4.0 g/ton, se obtiene una diferencia en el VAN de 19.12 MUS\$ a favor.

4.4.3. Ranking 3 – Ley de oro

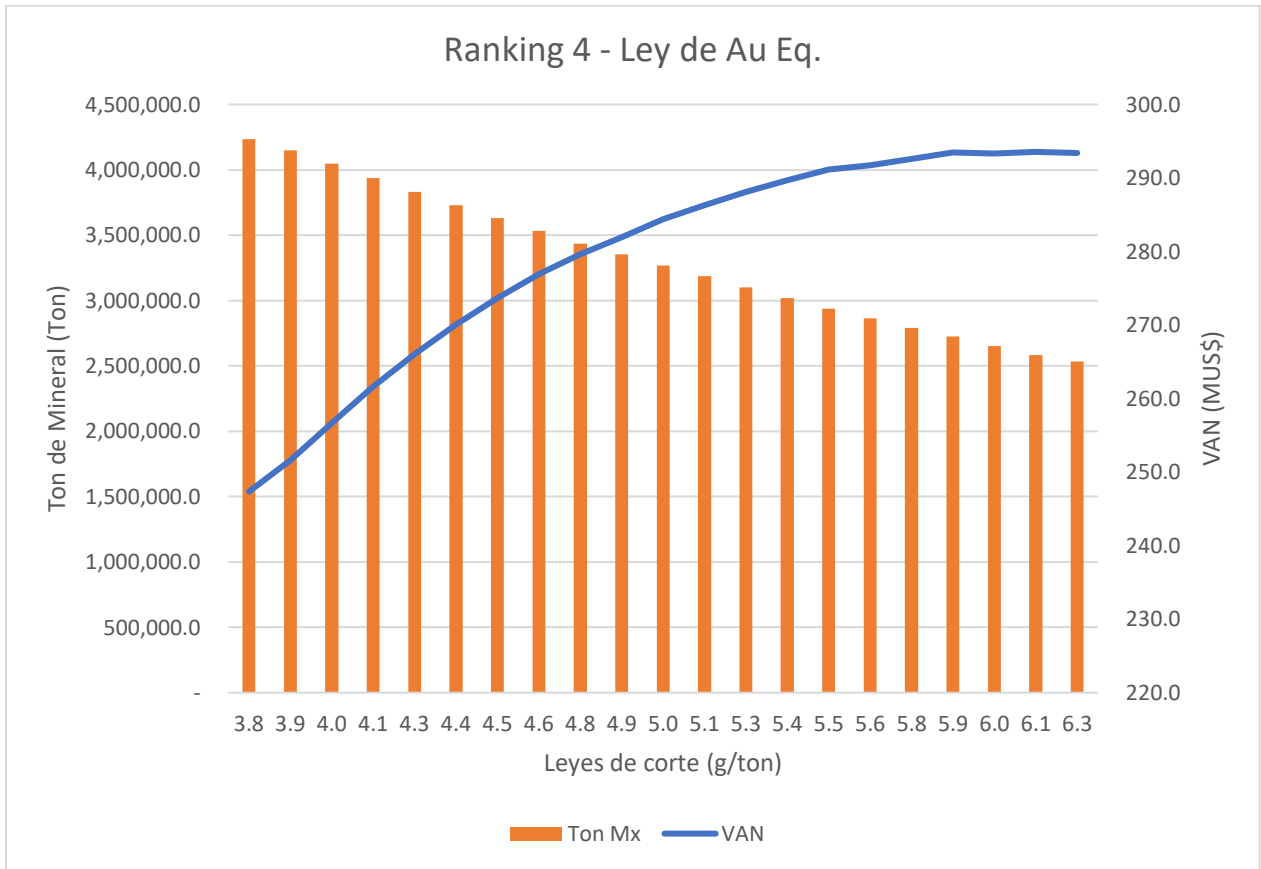
Tabla 11: Curva de VAN en función de la ley de corte para el tercer ranking.



Para este ranking, el VAN óptimo es de 325 MUS\$ a una ley de corte óptima de 5.5 g/ton. Comparando el resultado que entrega el mismo análisis para la ley de corte actual de 4.0 g/ton, se obtiene una diferencia en el VAN de 27.25 MUS\$ a favor.

4.4.4. Ranking 4 – Ley de oro equivalente

Tabla 12: Curva de VAN en función de la ley de corte para el cuarto ranking.



Para este ranking, el VAN óptimo es de 294 MUS\$ a una ley de corte óptima de 6.1 g/ton. Comparando el resultado que entrega el mismo análisis para la ley de corte actual de 4.0 g/ton, se obtiene una diferencia en el VAN de 36.84 MUS\$ a favor.

4.5. Iteraciones de los Flujos de Caja utilizando óptimos locales

En un segundo cálculo, se obtienen las leyes de cortes optimas por flujo de caja de cada sector en particular obteniendo así la siguiente tabla:

Tabla 13: Leyes de corte optimas según flujo de caja por sector.

Sector	Lc (FC)	Ton de Mx
AES	6.0	852,841
BON	5.1	135,201
C505	4.8	450,563
C506	5.0	265,319
CMA	5.0	894,081
DOR	5.0	481,166
DWA	5.8	42,621
FLA	5.9	475,514
FOR	5.8	186,414
PRO	5.0	419,863
TODOS	5.1	4,277,600

Con esto, se realizan nuevamente iteraciones que utilicen el vector de leyes de corte obtenidos en vez de utilizar una ley de corte global ponderada como en los gráficos anteriores. Si bien el comportamiento es similar en cuanto a las curvas obtenidas, se presenta a continuación el VAN obtenido en cada uno de los cuatro rankings, comparándolo con lo obtenido mediante una ley de corte global.

Tabla 14: Comparativa de los VAN obtenidos utilizando óptimos locales y óptimo global.

Utilizando ley de corte global		Utilizando el óptimo de cada sector	
Criterio	VAN (MUS\$)	Criterio	VAN (MUS\$)
Ranking 1	339	Ranking 1	345
Ranking 2	351	Ranking 2	354
Ranking 3	325	Ranking 3	325
Ranking 4	294	Ranking 4	298

Como se puede ver de la tabla, y como era de esperar para el área de planificación largo plazo, el VAN es mayor cuando se utilizan los óptimos locales y el vector de leyes de cortes óptimas iterado en vez de utilizar un valor único que pondere a los sectores.

Otro análisis simple que se puede obtener de la tabla anterior es que, en ambos casos, es el ranking n° 2 (onzas de oro equivalente por metro a desarrollar) el mejor criterio ya que es el que otorga mayor VAN. Por tanto, a manera de reflejar esto gráficamente, se presenta a continuación el comportamiento del ranking 2 utilizando un total de 22 iteraciones del vector de leyes de corte óptima según flujos de caja.

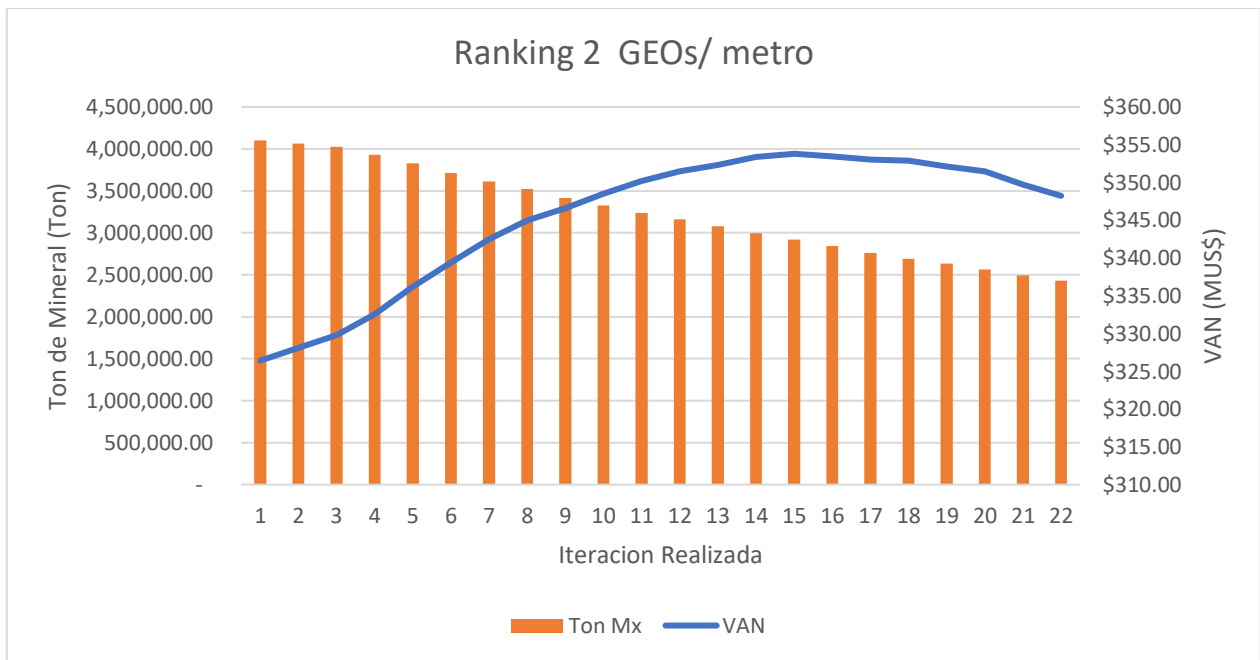


Gráfico 18: Curva de iteraciones para el Ranking 2 utilizando vector de leyes de corte.

En este caso, el óptimo se encuentra en la 15ta iteración realizada, variando las leyes de cortes de cada sector en 0.1 g/ton cada vez que se iteraba. Por tanto, el vector óptimo corresponde al entregado en la siguiente tabla:

Tabla 15: Vector óptimo de leyes de corte por sector iterando los flujos de caja.

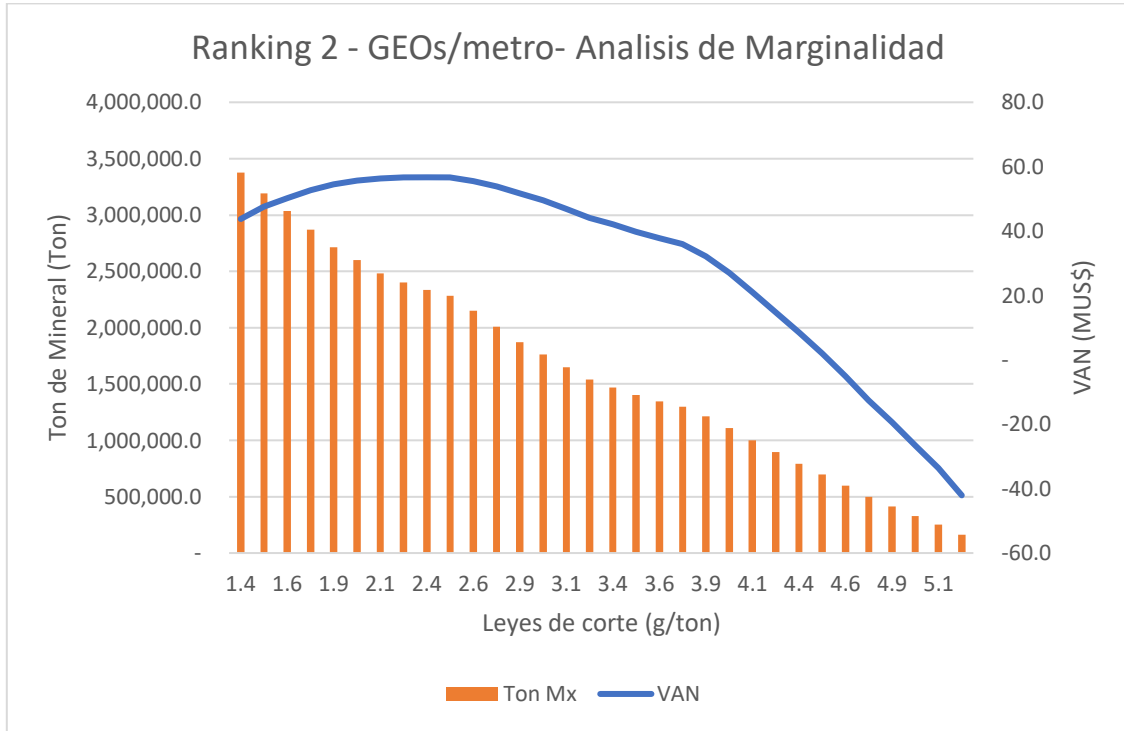
Sector	Lc (FC)
AES	5.3
BON	4.6
C505	4.3
C506	4.5
CMA	4.5
DOR	4.5
DWA	5.1
FLA	5.2
FOR	5.1
PRO	4.5

4.5.1. Análisis de Marginalidad - Ranking 2

Como se puede observar desde los resultados obtenidos en cada uno de los rankings, es justamente el ranking 2, onzas de oro equivalente por metro, el que genera el Plan Mina con el mayor VAN. Por lo tanto, se analizará la inclusión de minerales incrementales dentro de este mismo ranking, utilizando por tanto leyes de corte solo entre 1.0 y 5.3 g/ton, eliminando de la estadística todas las SMU que contenga una ley de oro equivalente mayor a 4.3 g/ton para que así, el incremento o decremento en el VAN sea representativo. Es muy importante señalar que este análisis considera el supuesto de que el mineral incremental se extrae una vez extraído todo el mineral anterior, es decir, una vez que se realiza todo el Plan Mina de los minerales que están por sobre la ley de corte equivalente calculada en el ranking 2.

A continuación, se presenta el VAN y las toneladas de mineral que se incluirían dentro del cálculo previo en caso de decidir realizar la extracción de dichos minerales.

Tabla 16: Curva de VAN en función de la ley de corte marginal para el análisis de los minerales incrementales según el primer ranking.



Para este análisis, el VAN óptimo es de 45.36 MUS\$ a una ley de corte marginal óptima de 2.4g/ton. Por lo tanto, existe un incremento en el VAN calculado en el ranking 2 al decidir incluir estos minerales.

4.6.Herramienta Creada

Dentro de las problemáticas existentes hoy en día para este estudio en el área de Planificación a Largo Plazo, está el hecho de que este cálculo es realizable solo en base a un escenario, no ajustable en el tiempo y de parámetros fijos. Es por esto que todo el cálculo mostrado en las secciones anteriores se realizó mediante una herramienta de Microsoft Office Excel denominada *Visual Basic Application* (VBA). Esta aplicación permite crear un código dentro de la planilla de Excel que genere uno o más cálculos matemáticos de manera algorítmica e iterativa utilizando parámetros anteriormente configurados para que, si el planificador desea cambiar un parámetro o un criterio por el motivo que estime conveniente, sea tan sencillo como cambiar el valor de una celda de la planilla y se puede volver a recalcular todo de manera automática.

La herramienta consta de un solo libro de trabajo, con 7 planillas (hojas) y 6 códigos en donde se almacena y calcula todos los resultados expuestos en este documento.

La primera planilla (llamada “BD”) corresponde a la base de datos de las cubicaciones que entrega la herramienta *Stope Optimiser* de Vulcan. Teniendo así en esta hoja tabulada la siguiente información: el nombre del sector al que pertenece, la ley de Au, Ag y Au Equivalente, las onzas de Au, Ag y GEO y el tonelaje de la SMU.

La segunda planilla (llamada “Seteo”) posee todos los parámetros, por sector, necesarios para realizar todos los cálculos de los códigos posteriores. De manera ordenada, se tiene en esta hoja los costos (mina, planta, estéril, transporte, drift, accesos, desarrollos, G&A, selling cost), las recuperaciones metalúrgicas de Au y Ag, los precios de los metales, la precisión a la que funciona Lane, el KPI original de los metros y el perfil de producción de *ramp-up*. Si se desea corregir o modificar algún valor, se debe cambiar el valor de la celda dentro de esta hoja y volver a calcular, si se agregan nuevos sectores cubicados en “BD”, se deben agregar los parámetros correspondientes en esta hoja.

La tercera planilla (llamada “CTL”) posee una tabla dinámica con toda la información que se encuentra en la planilla “BD”, con esto crea a su vez, sector por sector, la tabla de

datos que genera los gráficos de la curvas tonelaje ley mostrados en la sección 4.3.1. En esta planilla además se encuentran 5 botones correspondientes a 5 de los 6 códigos que se explicarán a continuación, logrando así calcular el valor de la ley de corte según Lane para todos los sectores, el valor de la ley de corte marginal según Lane para todos los sectores, el secuenciamiento de los sectores respecto a cada uno de los cuatro rankings o criterios seleccionados y dos códigos extras que permiten realizar consultas, por sector, respecto al cálculo obtenido por Lane y por Flujo de Caja. De manera automática esta planilla se actualiza en caso de agregar uno o más sectores cubricados en la sección de “BD”.

La cuarta planilla (llamada “Lane”) es la que muestra los valores del Valor Presente por mina, planta y mercado para cada una de las leyes de cortes de las tablas de los sectores ubicadas en “CTL” (las que actualmente van desde 0.01 a 10 con un incremento de 0.1), grafica estos datos y entrega a su vez la ley de corte óptima según esta metodología junto al beneficio que se obtendría a dicha ley, expresado en MUS\$/año. Esta planilla se utilizada a modo de consulta cuando se quiere verificar el correcto comportamiento de un sector en específico, siendo capaz de ser sobre escrita en caso de que se consulte otro sector a posterior. La siguiente imagen corresponde a una consulta realizada al sector C505, el cual presenta, según Lane, una ley de corte optima de 3.5 (g/ton) y un beneficio óptimo de 15 MUS\$/año.

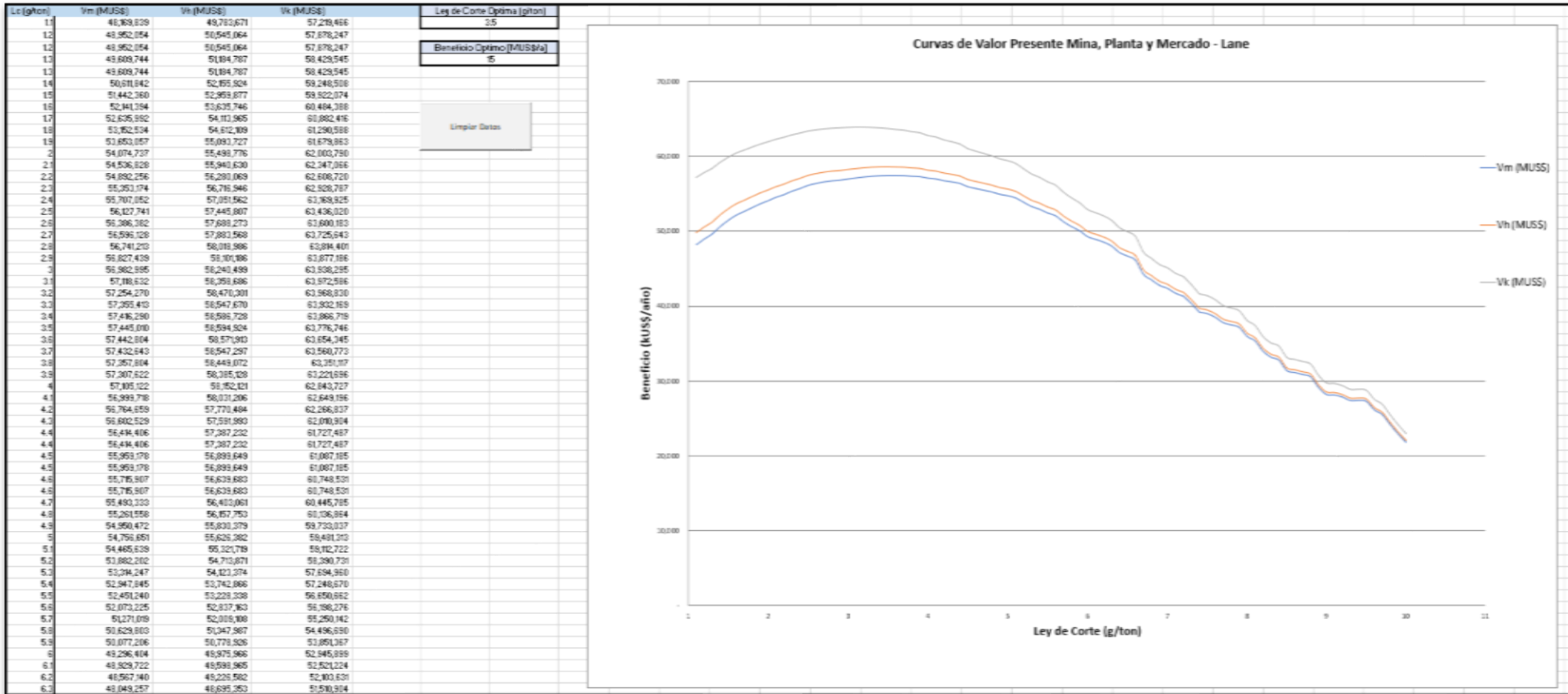


Figura 7: Cálculo de Lane para el sector C505 dentro de la Herramienta Creada.

La quinta planilla (llamada “VAN - Lc”) es la que muestra los valores del Valor Presente Neto de la mina para cada una de las leyes de cortes utilizadas dentro del rango de iteración establecido previamente por el planificador. De forma análoga a la planilla anterior, muestra de forma tabulada los datos de ley de corte y de VAN para el rango de iteración, graficando además una curva de VAN en función de la ley de corte y mostrando el VAN óptimo (en MUS\$) y la ley de corte óptima asociada a este (en g/ton). Esta planilla también es capaz de ser sobre escrita en caso de que se consulte por otro tipo de secuenciamiento o se utilice otro rango de iteración. La siguiente imagen corresponde a una iteración entre ley de corte 3.0 y 5.0 g/ton, con su respectivo VAN y Toneladas de Mineral asociadas para el cuarto ranking (Ley de Au Equivalente) el cual presenta un VAN Óptimo de 241.8 MUS\$ y una ley de corte optima de 4.7 (g/ton).

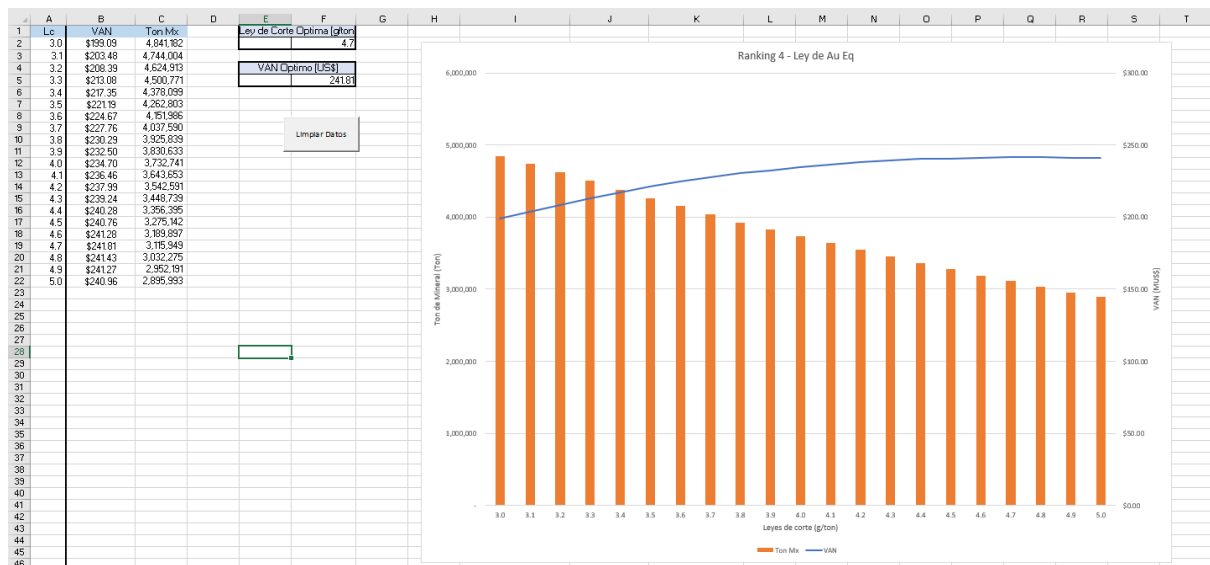


Figura 8: Cálculo de VAN y Lc óptima para el ranking 4 - Ley de Au Eq.

La sexta planilla (llamada “Plan Mina - Detallado”) entrega en primera instancia, al costado izquierdo, un resumen de costos y recuperaciones por sector y un resumen de los resultados de la iteración que logró el resultado óptimo. En esta planilla se encuentra además el último código encargado de generar la secuencia de extracción y que itera según el rango impuesto por el planificador cuyo resultado finalmente se deposita en la planilla anterior. Al lado derecho de la misma, entrega los valores calculados por este código separado por meses,

por sector y por parámetro del flujo de caja, calculando al final de esta tabla los ingresos, gastos y beneficios mensuales, la tasa de descuento (anual y mensual) y el VAN en MUS\$.

La última planilla (llamada “Plan Mina”) corresponde a una tabla dinámica que muestra, a modo de resumen, todo lo calculado en la planilla anterior, de esta manera es más sencillo ver las toneladas de mineras, los metros a desarrollar y las onzas de mineral que se procesan mes a mes, sector por sector, y así además ver en qué mes empieza y termina la producción en cada sector.

A modo de ejemplo, la siguiente imagen muestra el resumen del Plan Mina para un secuenciamiento realizado en base al 4to ranking - Ley de Au Equivalente.

A continuación, se procede a explicar los códigos que se desarrollaron para el funcionamiento de esta herramienta.

4.6.1. Código 1 - Cálculo de Lane

El código que realiza el cálculo de Lane se basa en esta metodología para encontrar el valor de la ley de corte óptima en cada sector de manera automática solo haciendo click en un botón llamado “Lc Lane”. Este algoritmo utiliza cada una de las leyes de cortes consideradas dentro de la tabla de tonelaje ley ubicadas en la planilla “CTL” para determinar un tonelaje de mineral, de estéril y una ley media de oro equivalente. Con esto y con los parámetros de costos, precios y recuperaciones metalúrgicas que lee desde la planilla “Seteo”, valoriza según mina, planta y mercado, preguntando dentro del algoritmo si el beneficio calculado es mayor o menor al calculado en la iteración anterior y armando así la curva. Al encontrar el valor máximo, es decir, cuando la curva converge, entrega dentro de la misma planilla de “CTL” la ley de corte asociada a éste definiendo así la ley de corte óptima del sector según Lane. Este código cuenta con la particularidad de que trabaja hasta que no haya datos, por lo que si se agregan más sectores a futuro no es necesario realizar ningún cambio al algoritmo.

4.6.2. Código 2 - Cálculo de Lane Marginal

Este código, de manera análoga al anterior, entrega la ley de corte óptima según Lane realizando un análisis solo a los minerales que se consideran como incrementales, es decir, a los minerales que presentan una ley de oro equivalente menor a la ley de corte equivalente. Para esto, el código solo realiza búsqueda e iteración de valores hasta la ley de corte equivalente encontrada por flujo de caja tomando en consideración la subvención de costos que entrega la ley de corte equivalente. Dentro de esto, se utiliza un costo mina equivalente al 40% del costo mina total, un costo fijo nulo y un desarrollo nulo de metros de accesos y desarrollos, por lo que las toneladas de estéril también disminuyen considerablemente. Estos valores se guardan en la fila siguiente a la del cálculo de la ley de corte óptima según Lane y se utilizarán para generar el secuenciamiento de los minerales incrementales

4.6.3. Código 3 – Ranking de Sectores

Dentro de la misma tabla de tonelaje ley ubicada en la planilla “CTL”, para cada sector, se calculan 2 criterios, para cada una de las leyes de cortes. El primero, consiste en dividir las onzas de oro por la suma de los metros de drifts, accesos y desarrollos, obteniendo así el ranking n°1. El segundo, calcula las onzas de oro equivalente (GEO) y las divide por la suma de metros, accesos y drifts obteniendo así el ranking n°2. Cuando se obtienen estos valores, se genera al costado derecho de la planilla un cuadro resumen con los sectores en donde el código, a través del botón “Ranrear Sectores”, se encarga de leer la ley de corte óptima según Lane de cada sector y tomar el valor de los cuatro indicadores para esa ley de corte en específico. Una vez toma estos cuatro valores, el código los ingresa dentro de este cuadro resumen y una vez obtenidos todos, se ordenan de mayor a menor según el ranking que uno elige a través de una lista de opciones desplegable y además entrega una aproximación de la duración de cada uno de los sectores, en meses, según su capacidad mina mensual, tal y como se ve en las siguientes figuras:

N° Sectores	Ranrear Sectores										
10	Rankings				Ranking 5	Ranking 1	Ranking 2	Ranking 3	Ranking 4	Ranking 5	Duracion (Meses)
Sector	Onza/metro	GEOs/Metro	Ley Au	Ley Au Eq	Ranking 5	Ranking 1	Ranking 2	Ranking 3	Ranking 4	Ranking 5	Duracion (Meses)
C505	6.56	7.55	5.76	6.64	1	3	2	5	#N/A	61	
AES	6.31	9.11	7.81	11.27	2	1	1	1	#N/A	181	
BON	5.47	6.38	5.09	5.93	3	7	4	8	#N/A	41	
C506	5.15	5.80	4.56	5.14	4	9	6	10	#N/A	109	
DWA	5.04	7.33	4.89	7.12	5	4	5	4	#N/A	13	
FLA	4.96	8.54	5.22	9.00	6	2	3	2	#N/A	165	
CMA	4.38	6.41	4.18	6.12	7	6	7	7	#N/A	121	
PRO	3.64	5.86	3.27	5.26	8	8	9	9	#N/A	142	
FOR	3.30	6.76	3.11	6.38	9	5	10	6	#N/A	171	
DOR	3.13	5.60	4.06	7.27	10	10	8	3	#N/A	100	

Figura 10: Cuadro resumen de los sectores ordenados de mayor a menor según el ranking 1 - Onza/metro.



Figura 11: Lista desplegable de los rankings en donde se utiliza, a modo de ejemplo, el ranking 3 - Ley de Au.

Rankings					Ranrear Sectores						
N° Sectores	Onza/metro	GEOs/Metro	Ley Au	Ley Au Eq	Ranking 5	Ranking 1	Ranking 2	Ranking 3	Ranking 4	Ranking 5	Duracion (Meses)
10											
AES	6.31	9.11	7.81	11.27		2	1	1	1	#N/A	181
C505	6.56	7.55	5.76	6.64		1	3	2	5	#N/A	61
FLA	4.96	8.54	5.22	9.00		6	2	3	2	#N/A	165
BON	5.47	6.38	5.09	5.93		3	7	4	8	#N/A	41
DWA	5.04	7.33	4.89	7.12		5	4	5	4	#N/A	13
C506	5.15	5.80	4.56	5.14		4	9	6	10	#N/A	109
CMA	4.38	6.41	4.18	6.12		7	6	7	7	#N/A	121
DOR	3.13	5.60	4.06	7.27		10	10	8	3	#N/A	100
PRO	3.64	5.86	3.27	5.26		8	8	9	9	#N/A	142
FOR	3.30	6.76	3.11	6.38		9	5	10	6	#N/A	171

Figura 12: Cuadro resumen de los sectores, ordenados de manera automática según el ranking 3 - Ley de Au.

Como se puede apreciar en las últimas figuras, existe dentro del cuadro resumen un Ranking 5 que no está definido actualmente, este se dejó deliberadamente como libre para que el planificador ingrese, de manera más sencilla, un quinto indicador en caso de considerarlo conveniente. El resultado que se obtiene desde este cuadro resumen es el que define a posterior el secuenciamiento que se genera en el último código.

4.6.4. Código 4 – Cálculo de Lane por Sector

Este código, almacenado en la planilla “CTL” realiza el mismo cálculo que el del código 1 con la diferencia que al hacer click despliega una lista de opciones respecto al sector que se desea consultar. Una vez se selecciona el sector, el algoritmo guarda los parámetros y calcula las curvas de V_m , V_h y V_k para cada ley de corte, depositando todos los valores dentro de la planilla “Lane”. El código además avisa cuando la iteración finaliza y muestra de manera automática la consulta que se realiza, como se ve, a modo de ejemplo, en la siguiente figura.

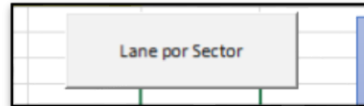


Figura 13: Botón que inicia el código.

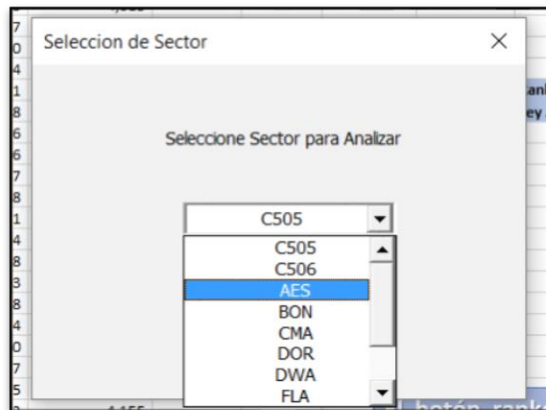


Figura 14: Lista desplegable para seleccionar el sector al cual calcularle la ley de corte óptima por Lane.

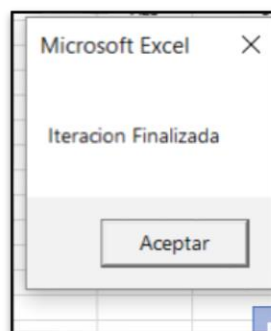


Figura 15: Aviso que indica que el cálculo de Lane ha finalizado.

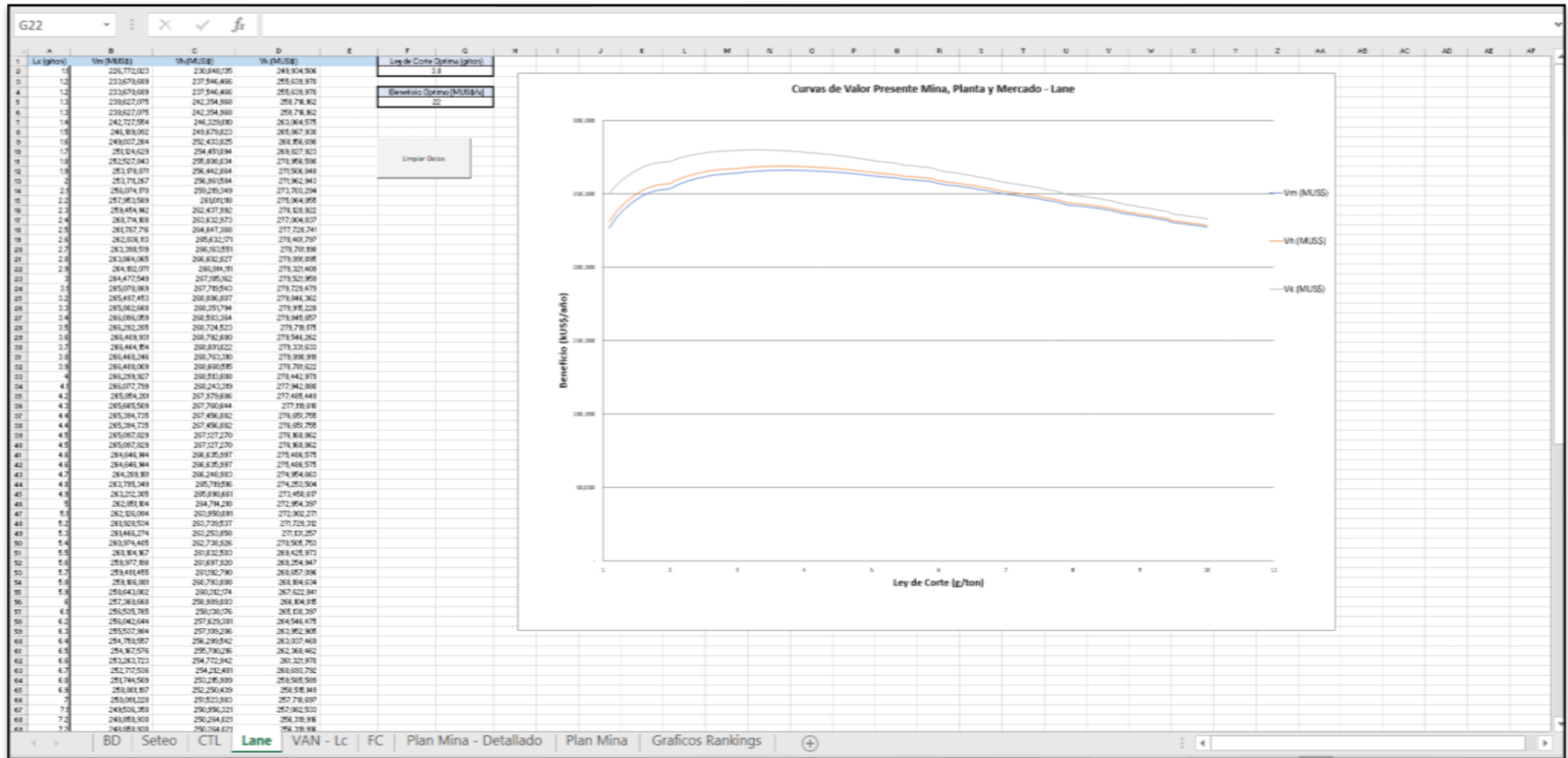


Figura 16: Resultado de la consulta de Lane una vez finalizada la iteración para el sector AES.

4.6.5. Código 5 – Cálculo de Flujo de Caja por Sector

Este código, almacenado en el botón “Flujo de Caja por Sector”, funciona de manera análoga al código anterior, consultando a través de una lista desplegable que sector le interesa analizar de manera particular respecto al cálculo de flujo de caja, añadiendo al cálculo los costos y temporalidad asociadas al flujo de caja.

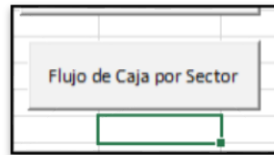


Figura 17: Botón que inicia el código.

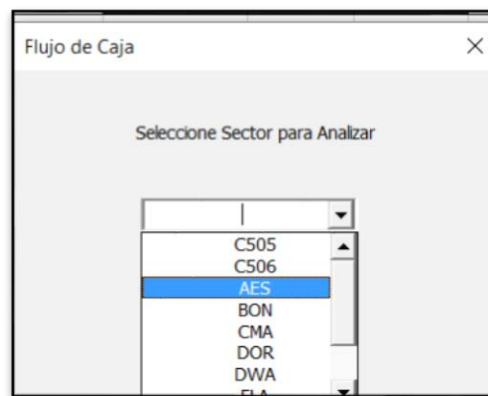


Figura 18: Lista desplegable para seleccionar el sector al cual calcularle la ley de corte por Flujo de Caja.

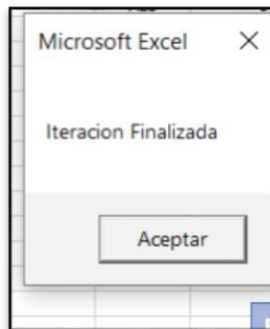


Figura 19: Aviso que indica que el cálculo del Flujo de Caja ha finalizado.

4.6.6. Código 6 – Generación de Secuenciamiento

Este código, almacenado en el botón “Generar Secuencia”, utiliza el cálculo de matrices dentro del *Visual Basic Application* para generar un secuenciamiento que cumpla con ciertas restricciones:

- Se extraen primero los sectores que presenten los valores más altos del indicador o ranking seleccionado.
- La capacidad mina mensual debe satisfacerse mediante la extracción de uno o más sectores de manera simultánea, no debe ser sobrepasada nunca y cada sector debe pasar por un proceso de *ramp-up*.
- A través de la ley de corte calculada por Lane para cada sector, se calcula una ley de corte ponderada que involucra a todos los sectores, por lo que la iteración se realiza solo para ese valor global.

Los datos se depositan dentro de la planilla “Plan Mina – Detallado” desde donde también se calcula el VAN que finalmente se deposita dentro de la tabla en la planilla “VAN – Lc”, asociada a una ley de corte. Al encontrar el valor óptimo, el cual corresponde al valor máximo de la curva convexa, el código se encarga de volver a calcular el algoritmo solo para la ley de corte óptima para así generar el plan mina detallado y resumido en la tabla dinámica ubicada en la planilla “Plan Mina”. Como se mencionaba en un principio, es necesario en este código que el cálculo se realice mediante matrices para que la herramienta sea capaz de involucrar de manera simultánea a uno o más sectores que posean parámetros y variables distintas. En caso de incluir más sectores, solo basta con incluir sus parámetros en la planilla de “Seteo” y aumentar las dimensiones de la matriz dentro de este código. Cabe destacar además que este código sirve para calcular todo el mineral como para también realizar el análisis de marginalidad respecto a los minerales incrementales. [9]

Capítulo 5 CONCLUSIONES

Respecto al objetivo principal de este estudio, correspondiente a evaluar económicamente la inclusión de los minerales incrementales para maximizar el negocio minero, se concluye que, debido a que cada uno de los rankings presenta una mejora en cuanto al VAN que se obtiene comparado con el caso base, efectivamente maximiza el negocio minero. Si bien la ley de corte óptima sube con respecto a la ley de corte actual, también sube a su vez el VAN, por lo que el realizar el análisis económico incluyendo a estos minerales incrementales sirven para obtener una visión más completa del espectro de reservas que se puedan extraer. Si bien estos minerales, considerados dentro del estudio como minerales con leyes de oro equivalente entre 1.0 y 3.0 g/ton, siguen siendo más bajos que la ley de corte óptima y que la ley de corte marginal, si son capaces de ser extraídos en caso de que los costos a futuro bajen y/o el precio de los minerales suba. Esto coincide respecto a la bibliografía referida al uso de Lane en operaciones mineras de oro en donde la capacidad mina es la limitante, ya que se expresa que una mina que está limitada por la capacidad minera debe ser operada tácticamente en lugar de estratégicamente, lo que significa que no se tiene un costo de oportunidad involucrado. Cuando se ha tomado la decisión de continuar operando, no hay límite para la capacidad de tratamiento: debe aumentar la producción a medida que el precio sube [5].

Se logró obtener a su vez un resumen de costos y mineralogías que dependen de las características intrínsecas de cada sector, demostrando que existen diferencias entre ellos. Es posible que, mediante el análisis a otras labores como Perforación y Tronadura o Relleno, se encuentren aún más diferencias en cuanto al costo mina. De forma similar, si se realiza un análisis a las distintas etapas que involucran al Procesamiento y posterior Refinación, sería posible tener un resumen de costos planta aún más diferenciado entre sector.

Si se comparan las toneladas de minerales, las onzas y por lo tanto las leyes medias que se tienen para cada sector en el caso base con lo obtenido desde el análisis realizado en este estudio, se puede observar que las toneladas de mineral bajan en aproximadamente 250 kton mientras que la ley media de oro equivalente sube desde 9.2 g/ton a 12 g/ton.

Es decir, una disminución de un 14% de las toneladas de mineral produce un aumento de un 32% en la ley media y a su vez un aumento de un 19% en el VAN por lo que es posible concluir que el mejor negocio no se produce necesariamente al extraer la mayor cantidad posible de mineral, al ser un análisis multivariable es necesario estudiar las toneladas de mineral y estéril, los finos de oro y plata, las leyes medias asociadas a estos y los metros necesarios a desarrollar para extraer las SMU's, entre otras variables. Por lo tanto, si bien la metodología de Lane y las curvas de tonelaje ley presentan una buena aproximación al estudio, debe realizarse un análisis más riguroso para la toma de decisiones.

Se genera una herramienta actualizable en el tiempo, de fácil manejo y capaz de incluir distintos criterios para el secuenciamiento del Plan Mina de acuerdo con los criterios que los planificadores de la Superintendencia de Planificación a Largo Plazo estimen convenientes. Dentro de esta herramienta, se comprueba además que, al agregar la temporalidad dentro del análisis, se logra afinar la aproximación primaria que se realiza mediante la metodología de Lane, obteniendo un resultado más acertado y cercano a la realidad para la división, lo que no necesariamente significa que sea un resultado que entregue mayor cantidad de onzas o un mayor VAN ya que el negocio óptimo podría estar en una mina de menor producción.

Por último, respecto nuevamente al secuenciamiento y asumiendo además que el único criterio es el VAN, se concluye que el mejor indicador es el n°2 y no el n°1 como se pensaba dentro de la corporación ya que presenta el mayor VAN de los cuatro sectores. Esta disyuntiva se presenta debido a que los sectores analizados presentan grandes cantidades de plata que no son tomadas en cuenta al analizar solo el oro pero que si ponderan al analizar el oro equivalente. Sin embargo, no es posible determinar que es el mejor indicador global debido a que, como se explicaba en el capítulo 4, existen muchos criterios posibles que se pueden tomar en cuenta para realizar el Plan Mina. Se concluye, además, como se esperaba, que el utilizar el óptimo local de cada sector para la iteración permite obtener un óptimo global que entrega un mayor VAN, en todos los criterios de rankings utilizados, respecto a lo que se obtiene utilizando una ley de corte global ponderada por las toneladas de mineral. Sin embargo, el incluir una gran cantidad de sectores a analizar haría que los tiempos de cálculo al iterar un vector de leyes y no un valor único sean mucho mayores.

Capítulo 6 RECOMENDACIONES

La recomendación más importante es que se realice el estudio incluyendo a todos los sectores dentro de la herramienta creada para calcular un valor que si pueda ser comparable a su totalidad con la realidad que hoy existe en la mina.

Adicional a esto, el haber tenido un conocimiento mayor respecto a todas las labores que se realizan dentro de la mina y sobre todo dentro de la planta y de cómo inciden estas dentro de su costo, habría colaborado a elaborar un resumen de costos por sector aún más detallado que expresara en su totalidad las diferencias que existen entre ellos. También, para maximizar la precisión y el espectro de casos posibles, se recomienda trabajar con las capacidades posibles de mina y planta y no solo con las que existen hoy por estadística. Esto, implica generar un modelo de costos en vez de un resumen debido a que, a distintas capacidades, los costos varían dependiendo del número y la capacidad de los equipos que se necesiten funcionando para conseguir la producción deseada.

Respecto al análisis de marginalidad, para agregarle mayor robustez a este análisis, sería posible a futuro identificar minerales incrementales dentro de rellenos antiguos que se realizaban con lo que en ese entonces se consideraba como estéril, botaderos antiguos y stock piles que puedan tener una ley media similar a la ley media calculada por este análisis. Sin embargo, se entiende la dificultad que esto tendría ya que para determinar las leyes existentes en botaderos y rellenos se tendría prácticamente que sondear todo de nuevo para realizar esta estimación. Quizás si en un futuro las leyes de corte óptima bajan, podría ser un estudio interesante desde el punto de vista económico.

Por último, existe una diferencia entre lo que se cataloga como recurso económicamente explotable y lo que se genera finalmente dentro de la operación como reserva. Históricamente, la estadística indica que el porcentaje de conversión del primero respecto al segundo varía entre un 70% y un 80%. Al no tener esta estadística para todos los sectores en estudio, se asumió que esta conversión era de un 70%. Por lo tanto, el incluir esto dentro del cálculo lograría dar un resultado más cercano al LOM.

De igual manera, el agregar al flujo de caja los conceptos mencionados en la sección 4.4 que se dejaron de lado, el incluir el efecto del *ramp-down* de cada sector y considerar una relación real entre lo que pertenece a drift de mineral y a drift de estéril, según el ancho de la veta de cada sector, hubiese influido en un cálculo de VAN y ley de corte óptima aún más preciso.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Stephan, de «*Cut and Fill Mining*», Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2011, p. Chapter 13.5.

- [2] Superintendencia de Planificación y Desarrollo, Gerencia de Servicios Técnicos, «Consideraciones para la Evaluación Económica de las SMU,» Minera Meridian Ltda., Antofagasta, 2018.

- [3] Superintendencia de Geometalurgia, Gerencia de Servicios Técnicos, «Influence of the Bonanza Vein Mineralogy in the Hydrometallurgical Au and Ag Leaching Process, El Peñón Mine, Chile,» Minera Meridian Ltda., Antofagasta, 2013.

- [4] R. Minnitt, «Cut-off grade determination for the maximum value of a small Wits-type gold mining operation,» The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburgo, 2004.

- [5] Estandar Corporativo de Sistema, Planificación Minera, «Protocolo de Estimación de Ley de Corte y Análisis de Marginalidad,» Yamana Gold Inc., Santiago, 2010.

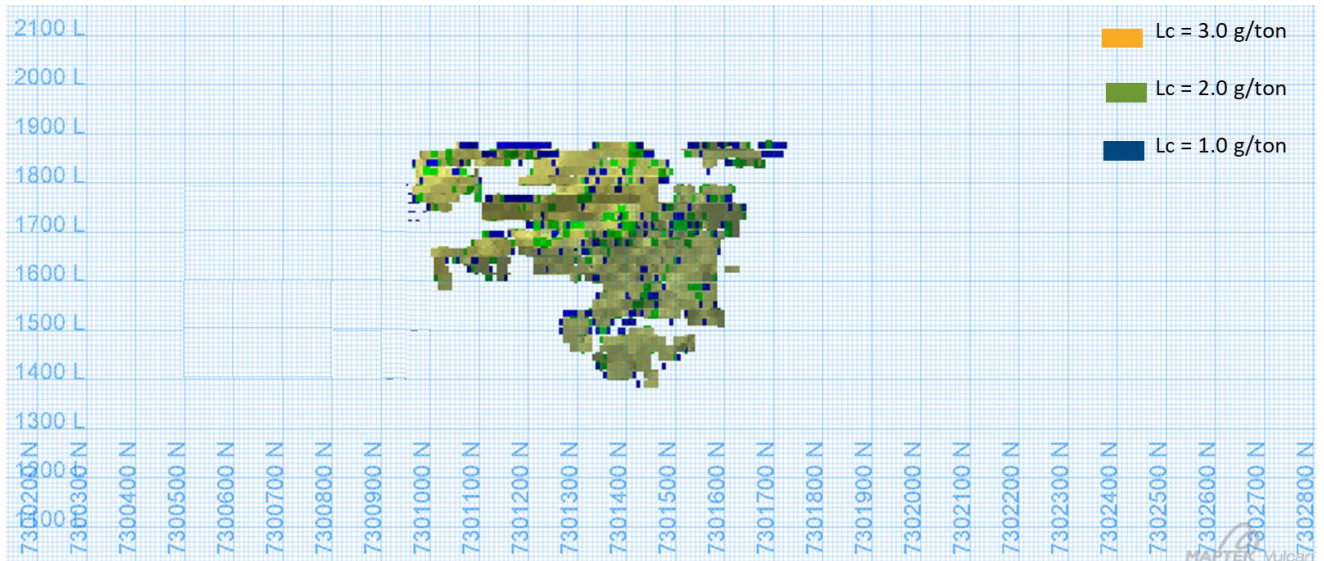
- [6] Superintendencia de Operaciones Mina, Gerencia de Operaciones, «Producción y Disparos Reales SDM_SGIE,» Minera Meridian Ltda., Antofagasta, 2017.

- [7] Superintendencia de Planificación y Desarrollo, Gerencia de Servicios Técnicos, «Descripción Método de Explotación El Peñón,» Minera Meridian Ltda., Antofagasta, 2009.

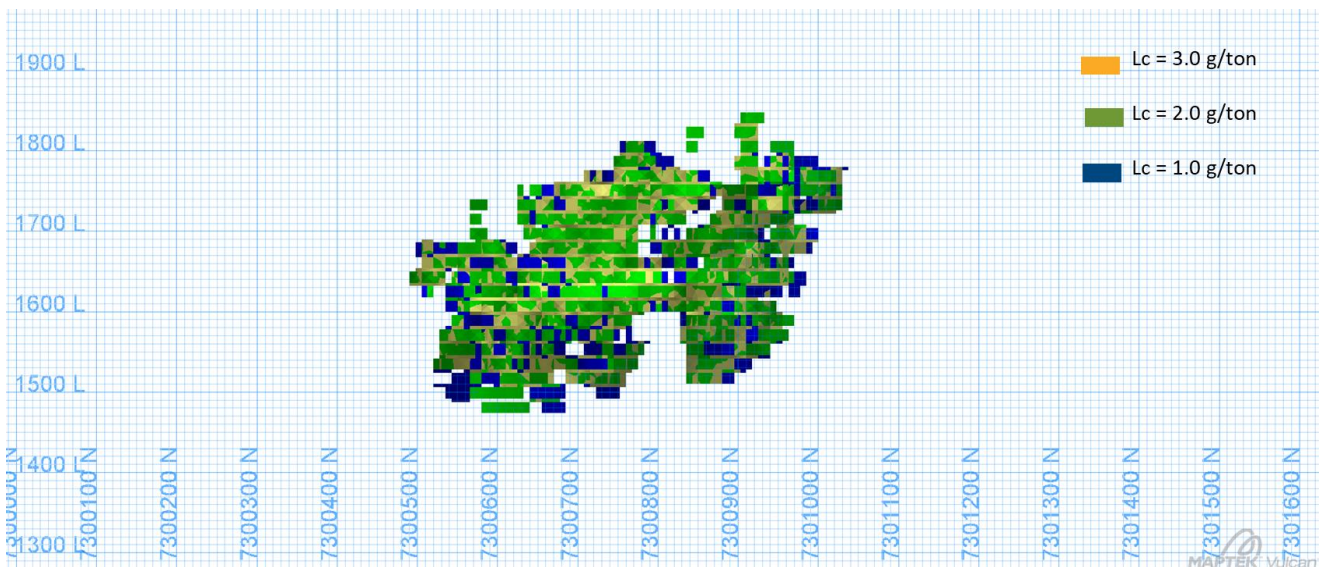
- [8] A. Bascetin, A. Nieto, «Determination of a Mining Cut-Off Grade Strategy based on an Iterative Factor,» Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME),, 2007.
- [9] C. Sandoval Miranda, Manual para el uso de herramienta que evalua la inclusión de minerales incrementales, Antofagasta, 2018.

Capítulo 8 ANEXOS

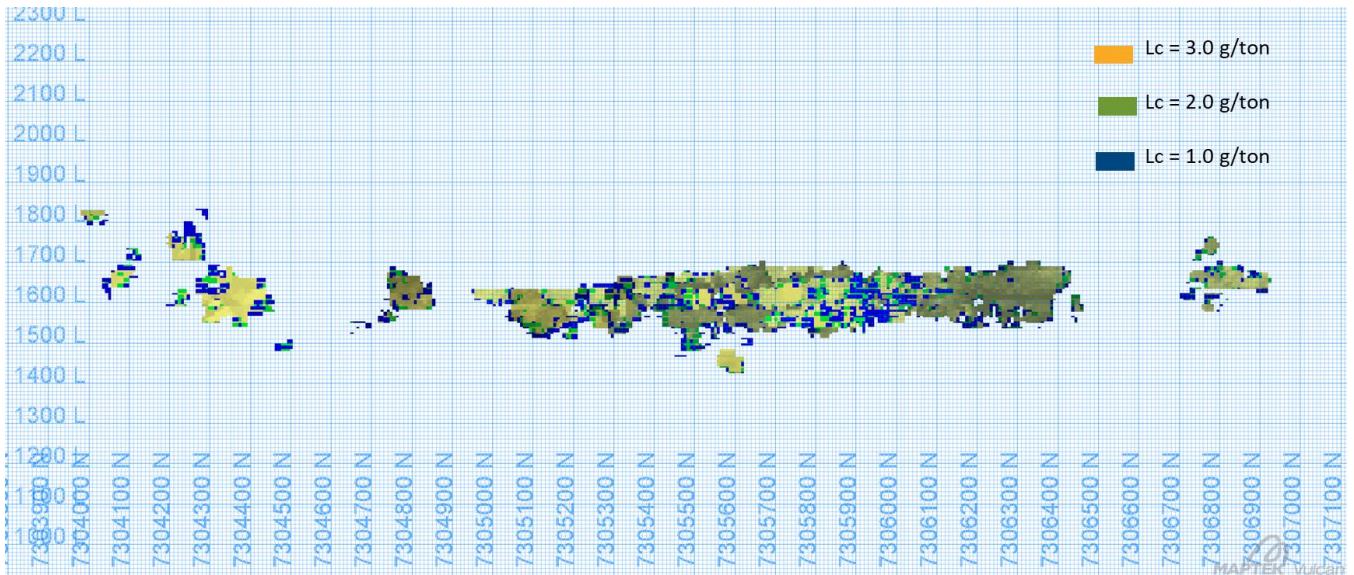
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector C505



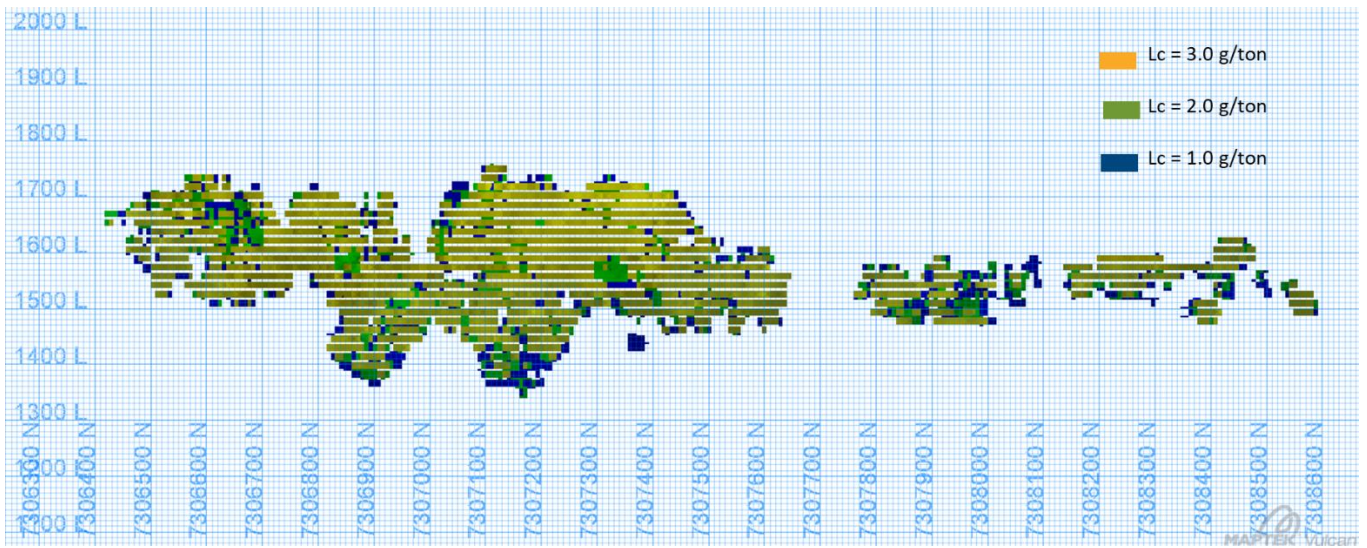
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector C506



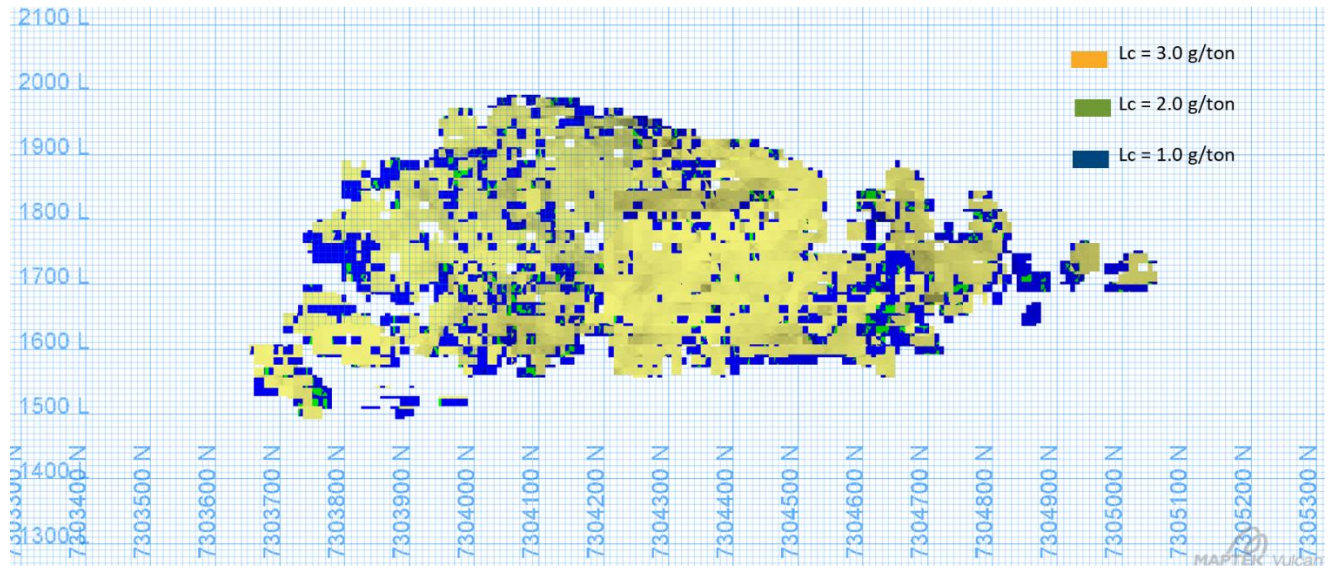
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector AES



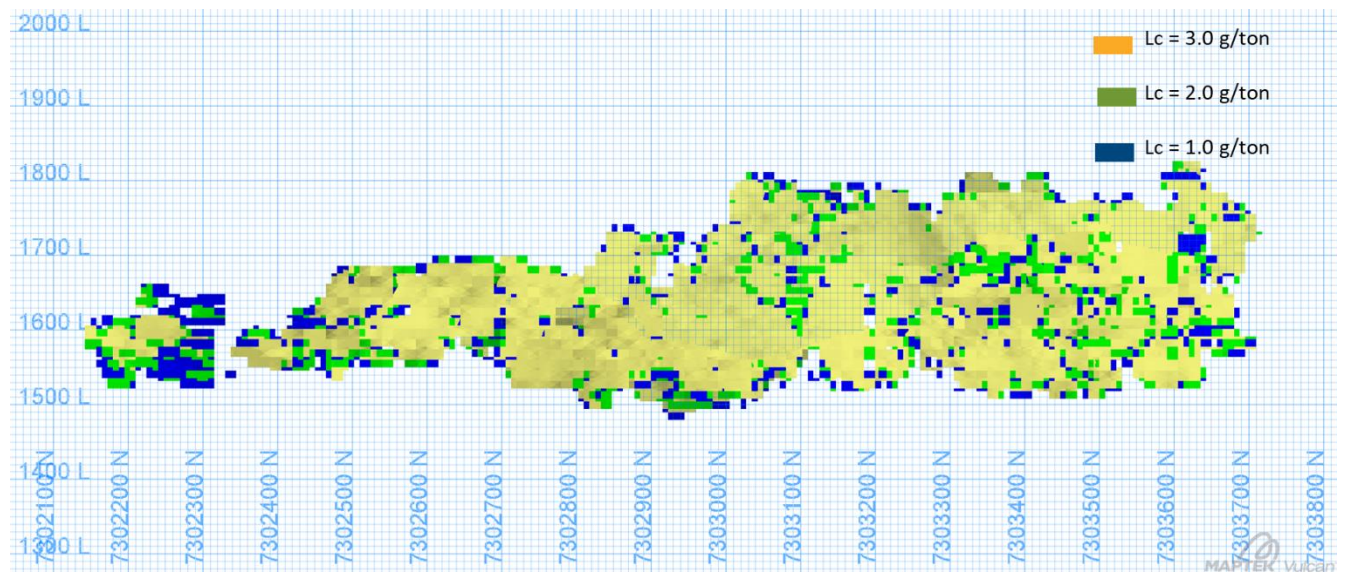
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector BON



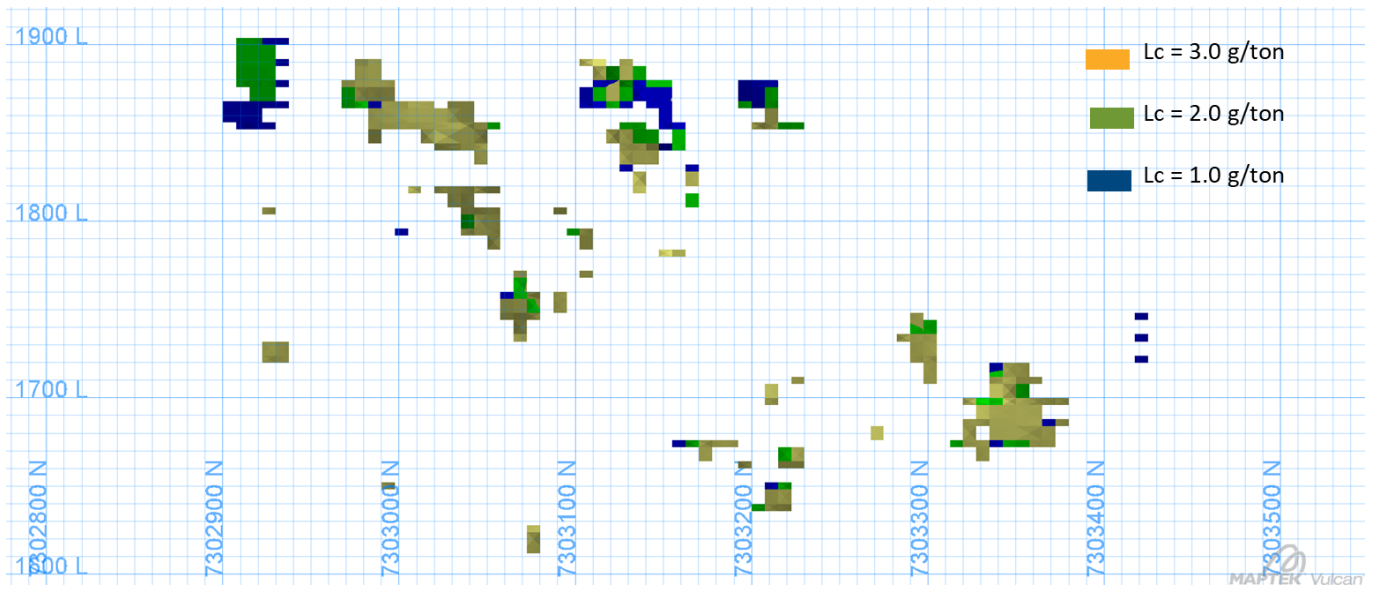
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector CMA



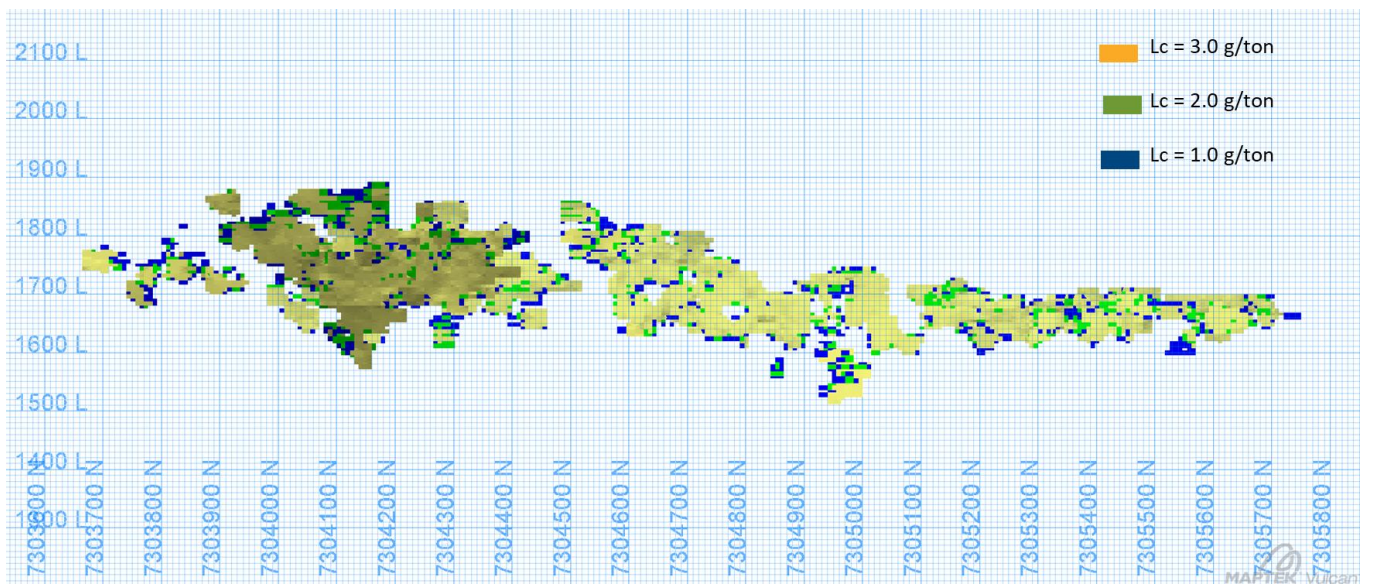
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector DOR



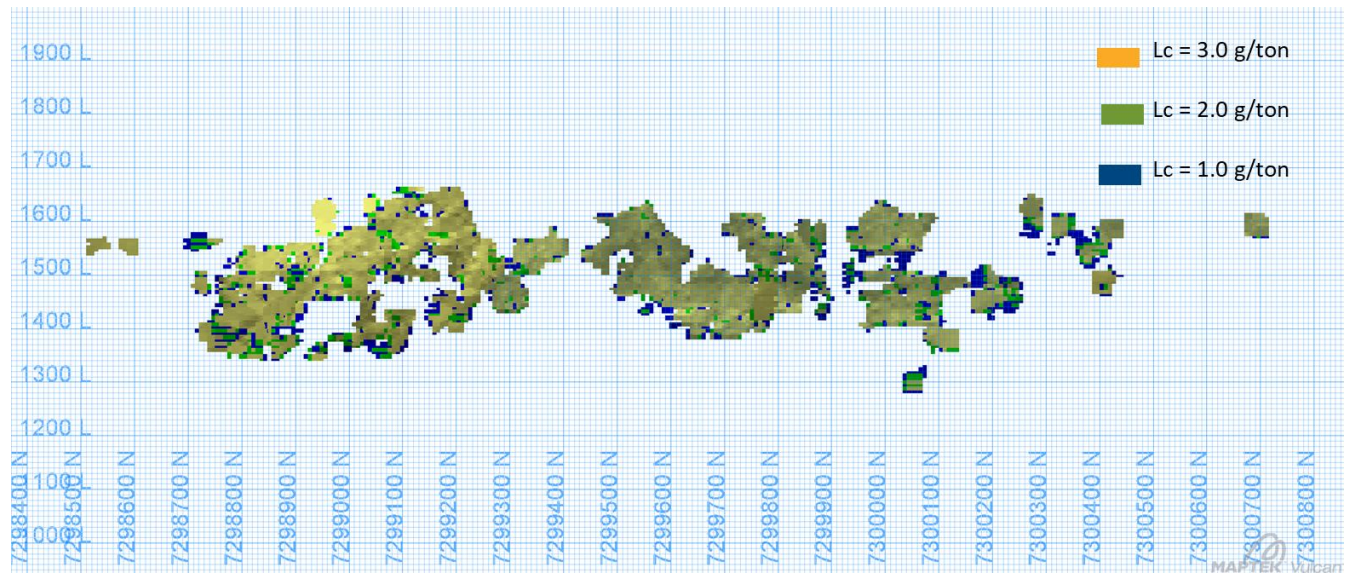
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector DWA



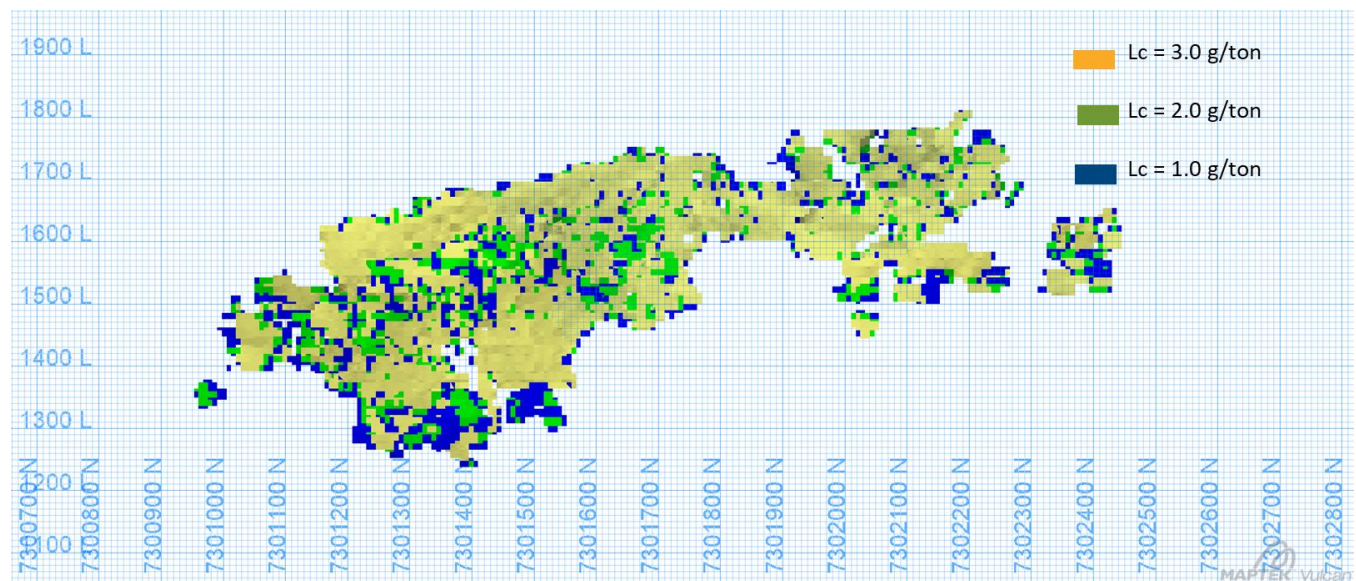
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector FLA



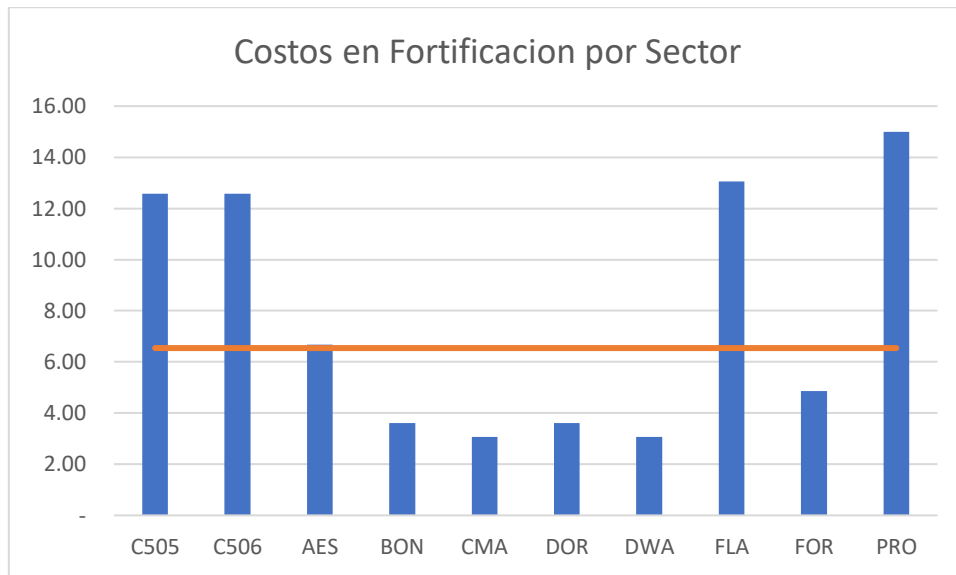
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector FOR



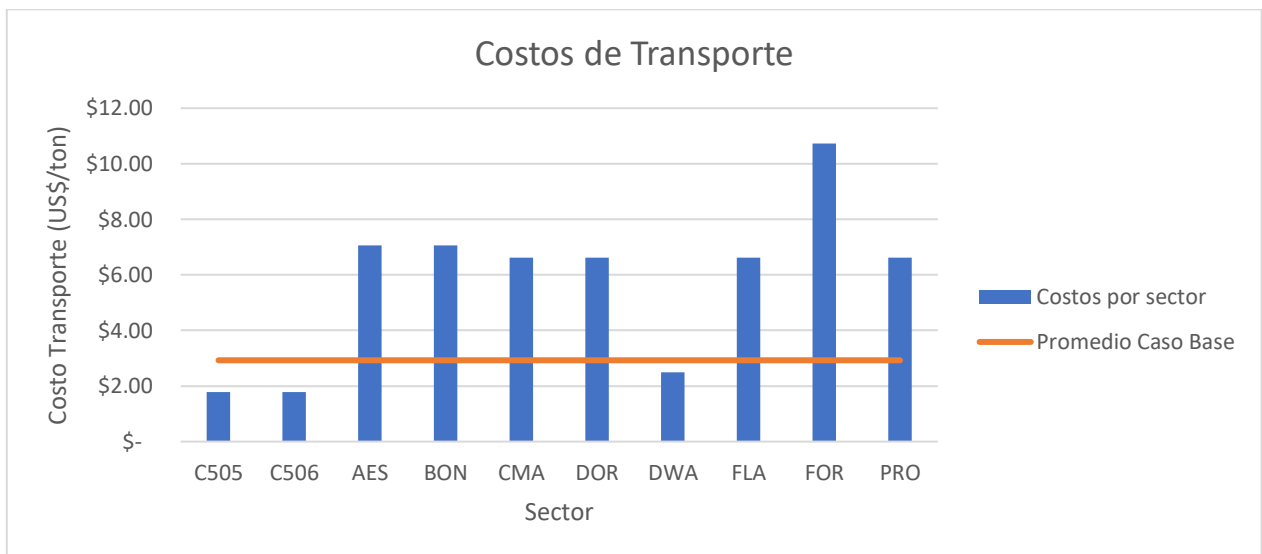
Vista Lateral del Diseño obtenido por *Stope Optimiser* – Sector PRO



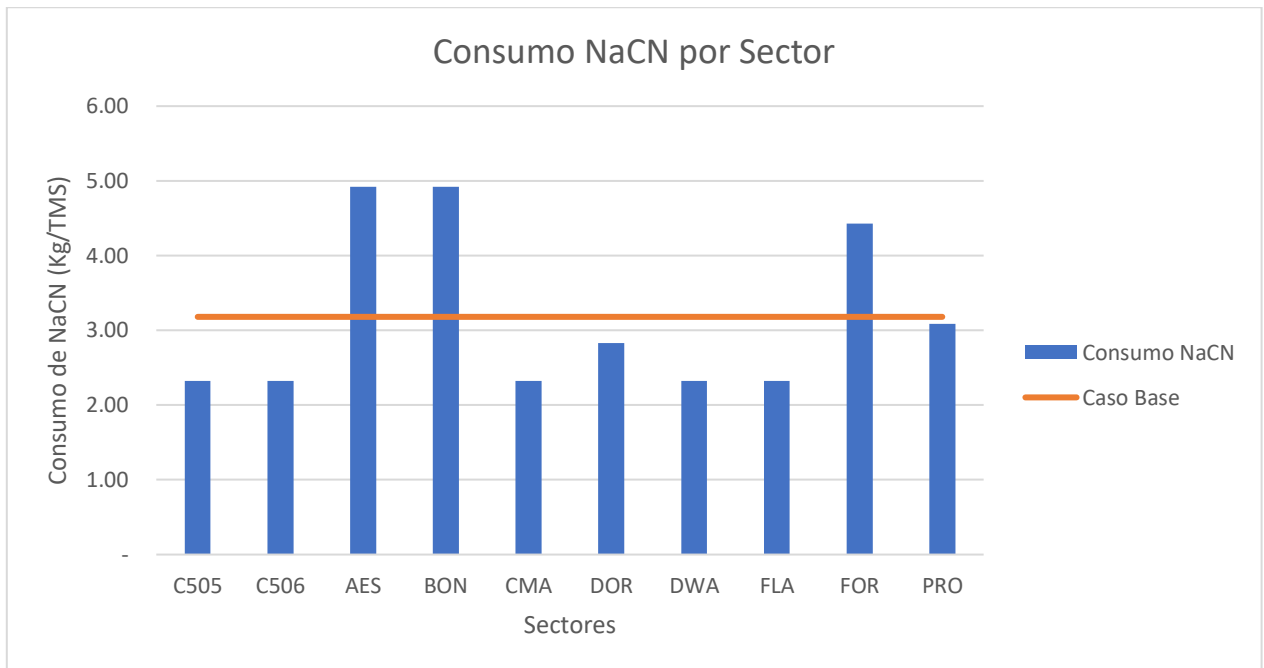
Resumen de los costos de fortificación por sector



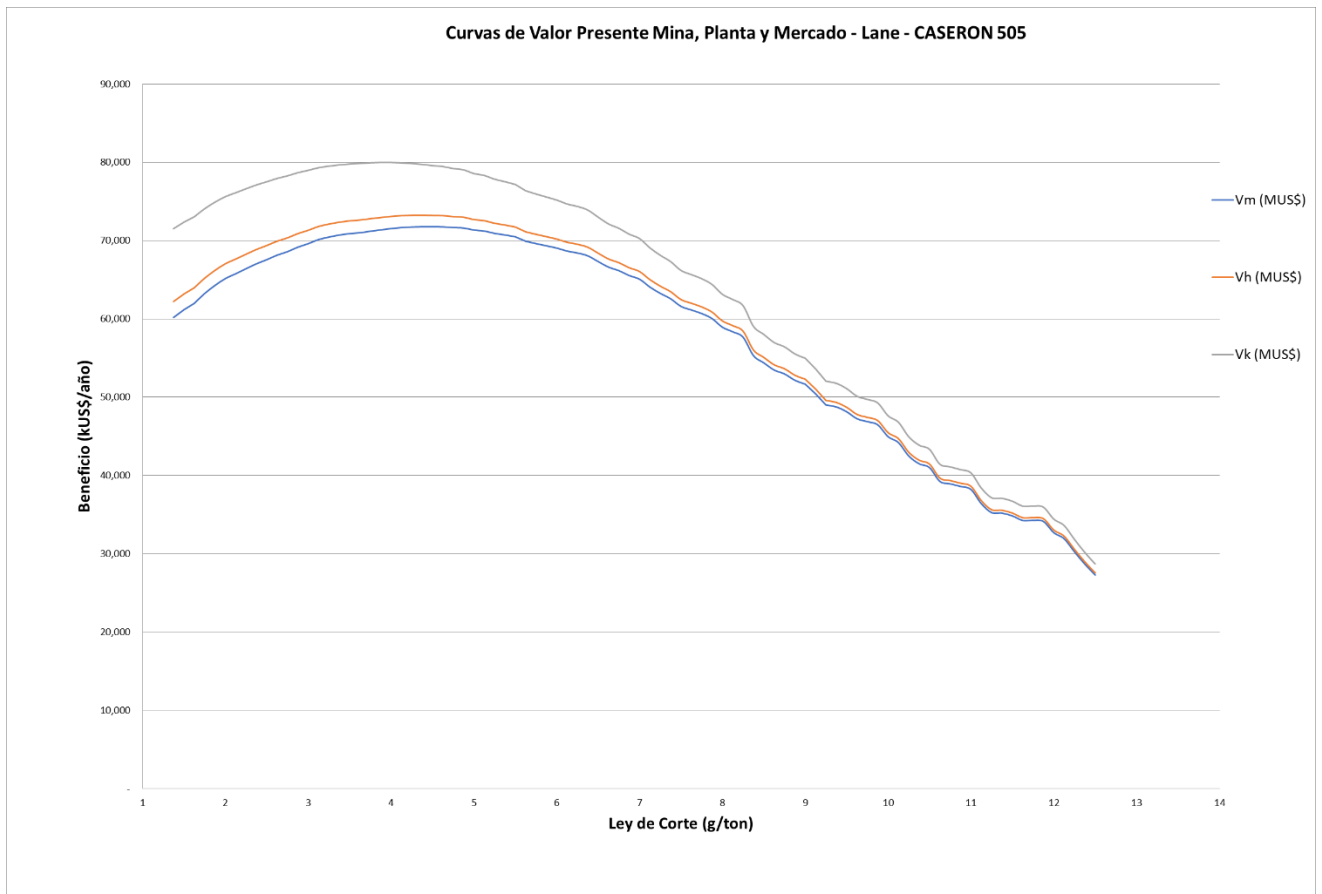
Resumen de los costos de transporte por sector



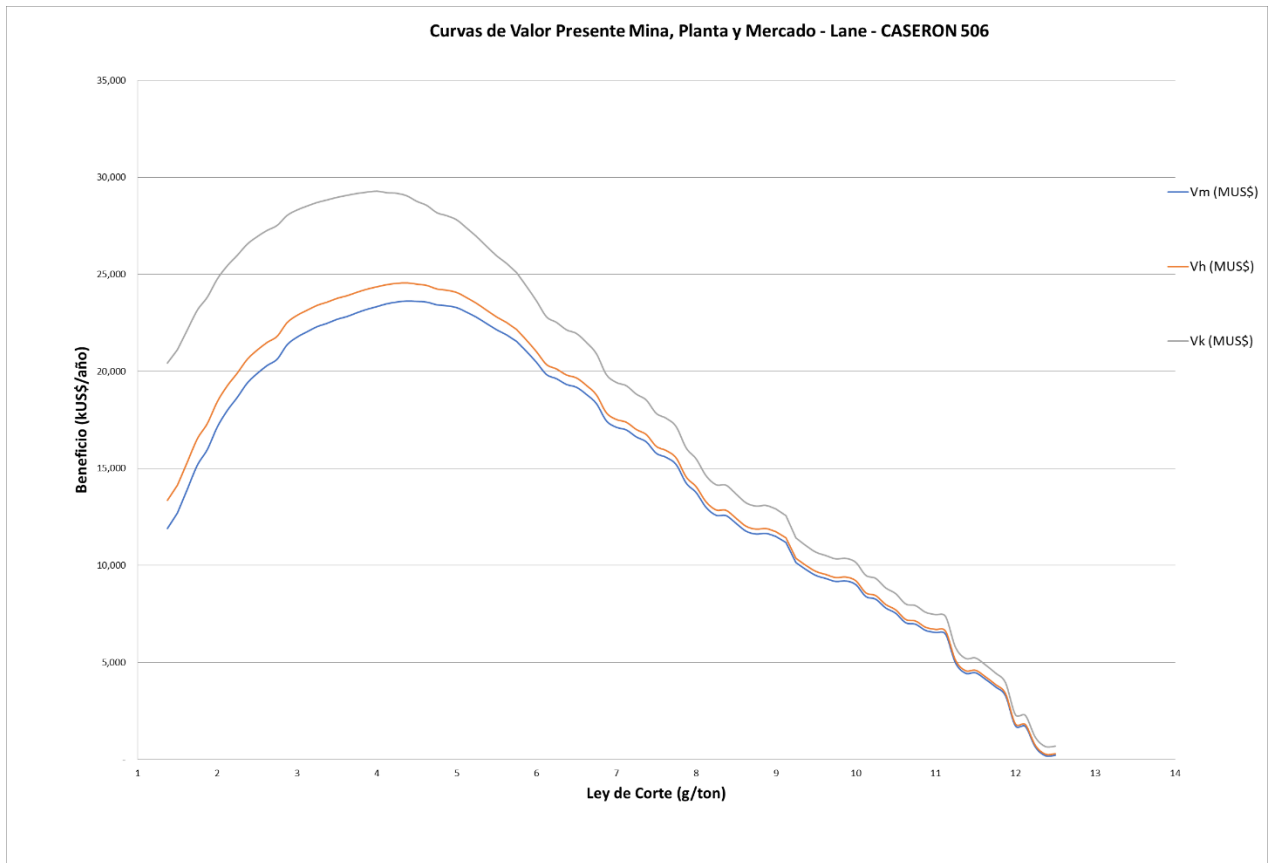
Resumen de los consumos de NaCN por sector



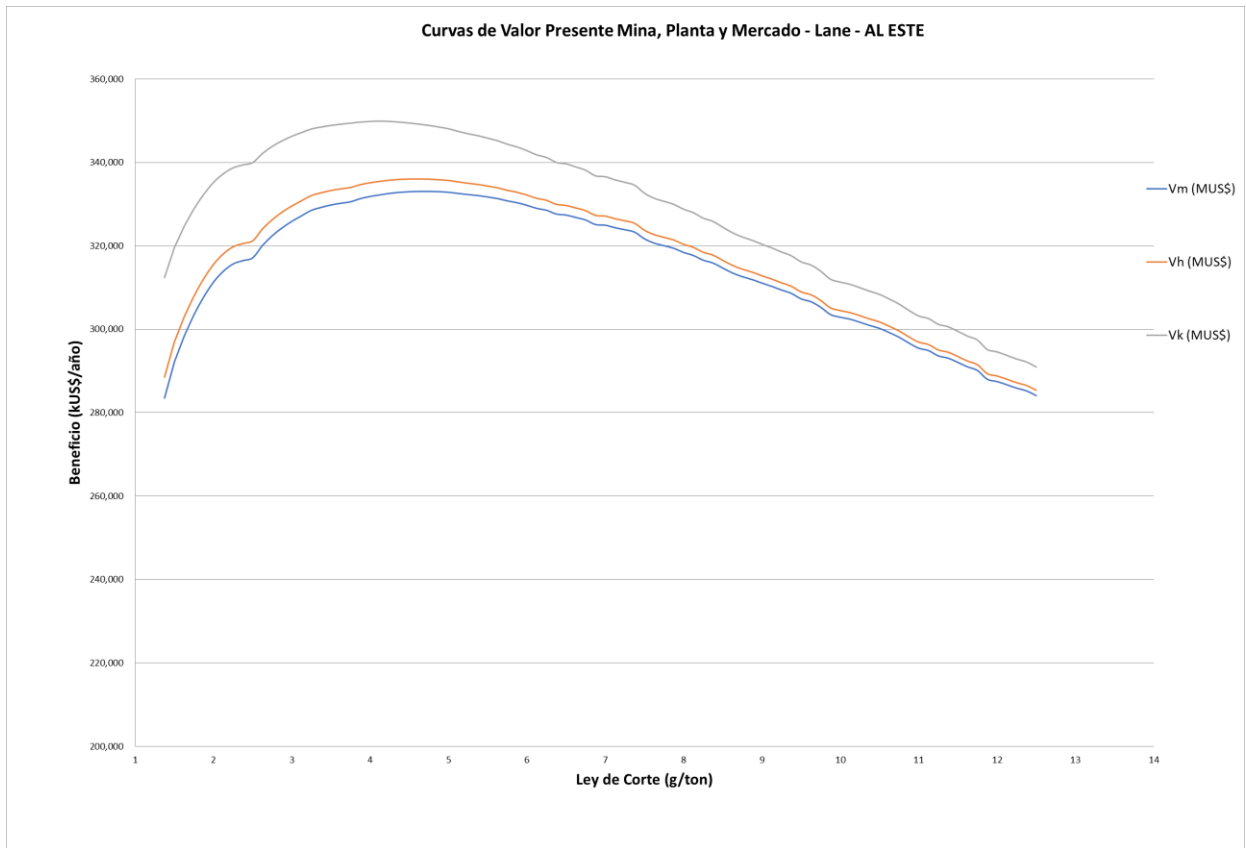
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector C505 ($L_c = 4.4$ g/ton)



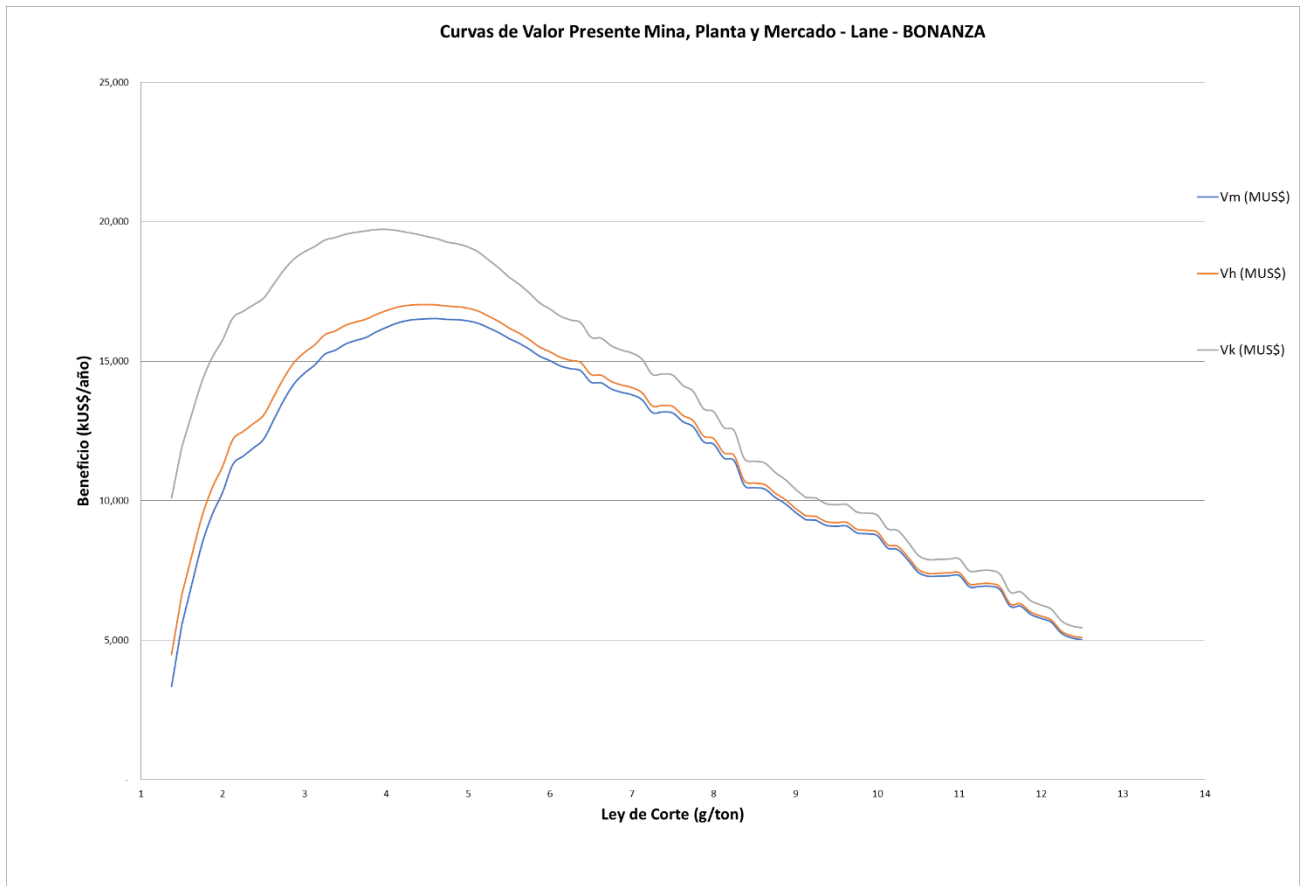
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector C506 ($L_c = 4.4$ g/ton)



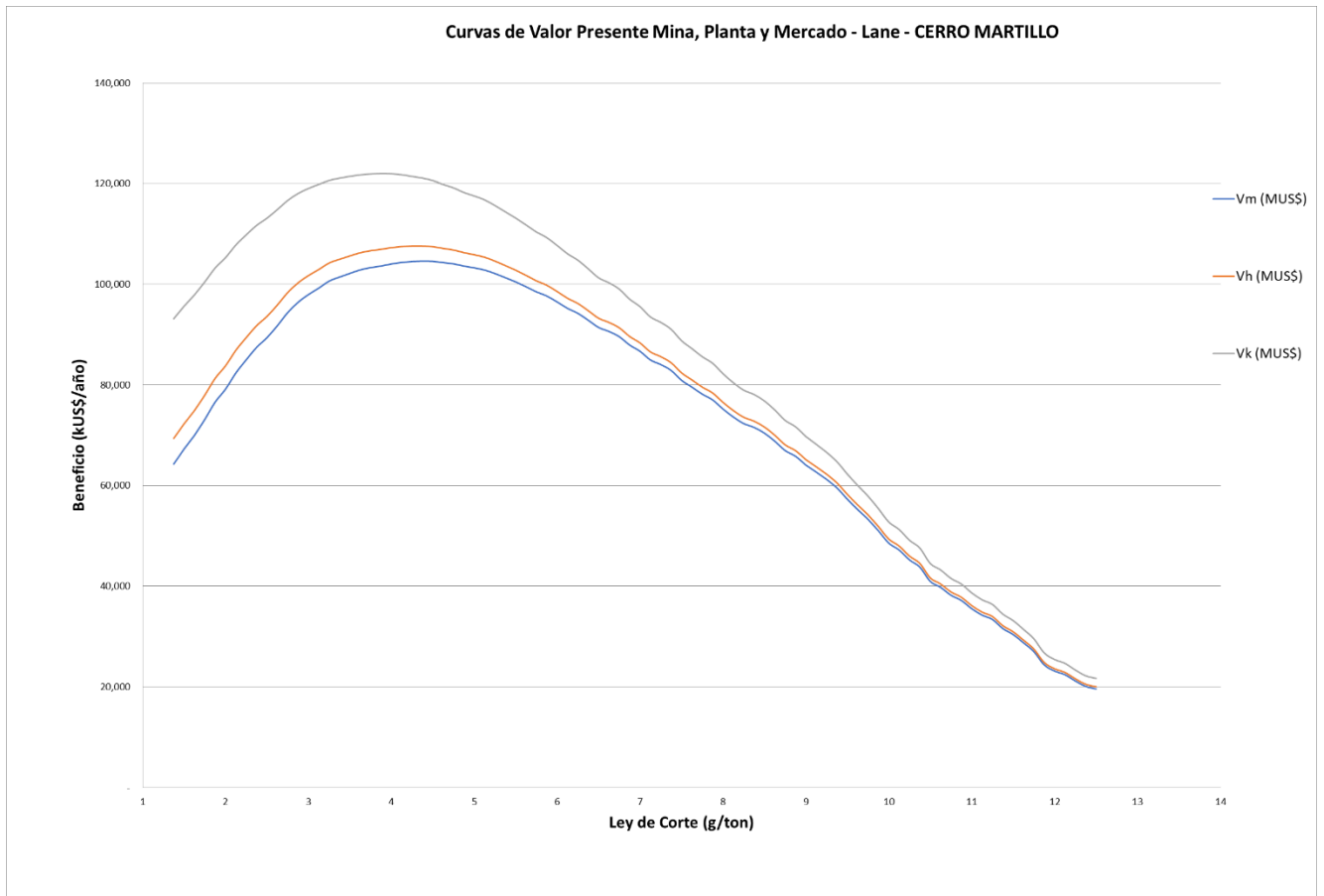
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector AES ($L_c = 4.8$ g/ton)



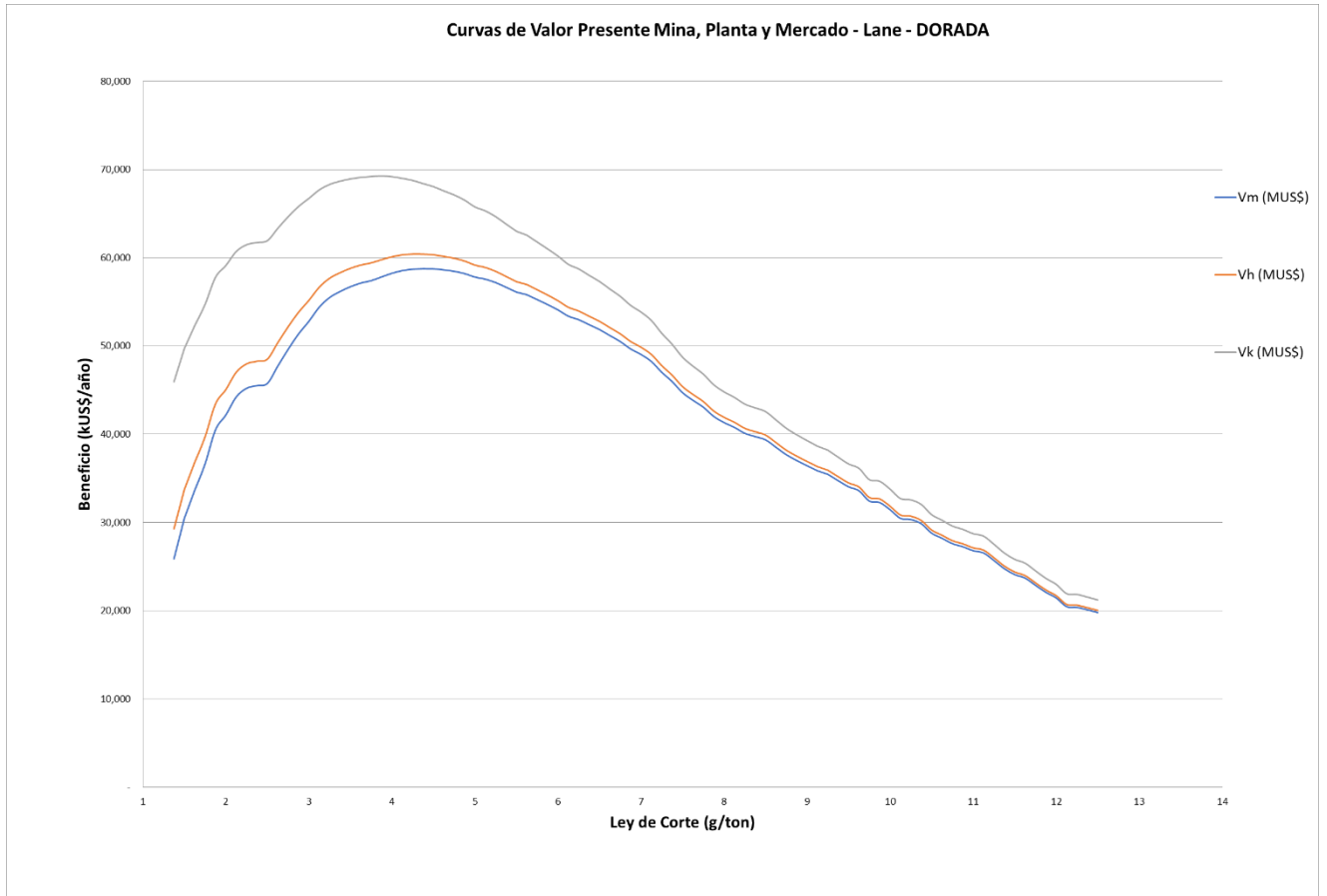
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector BON (Lc = 4.6 g/ton)



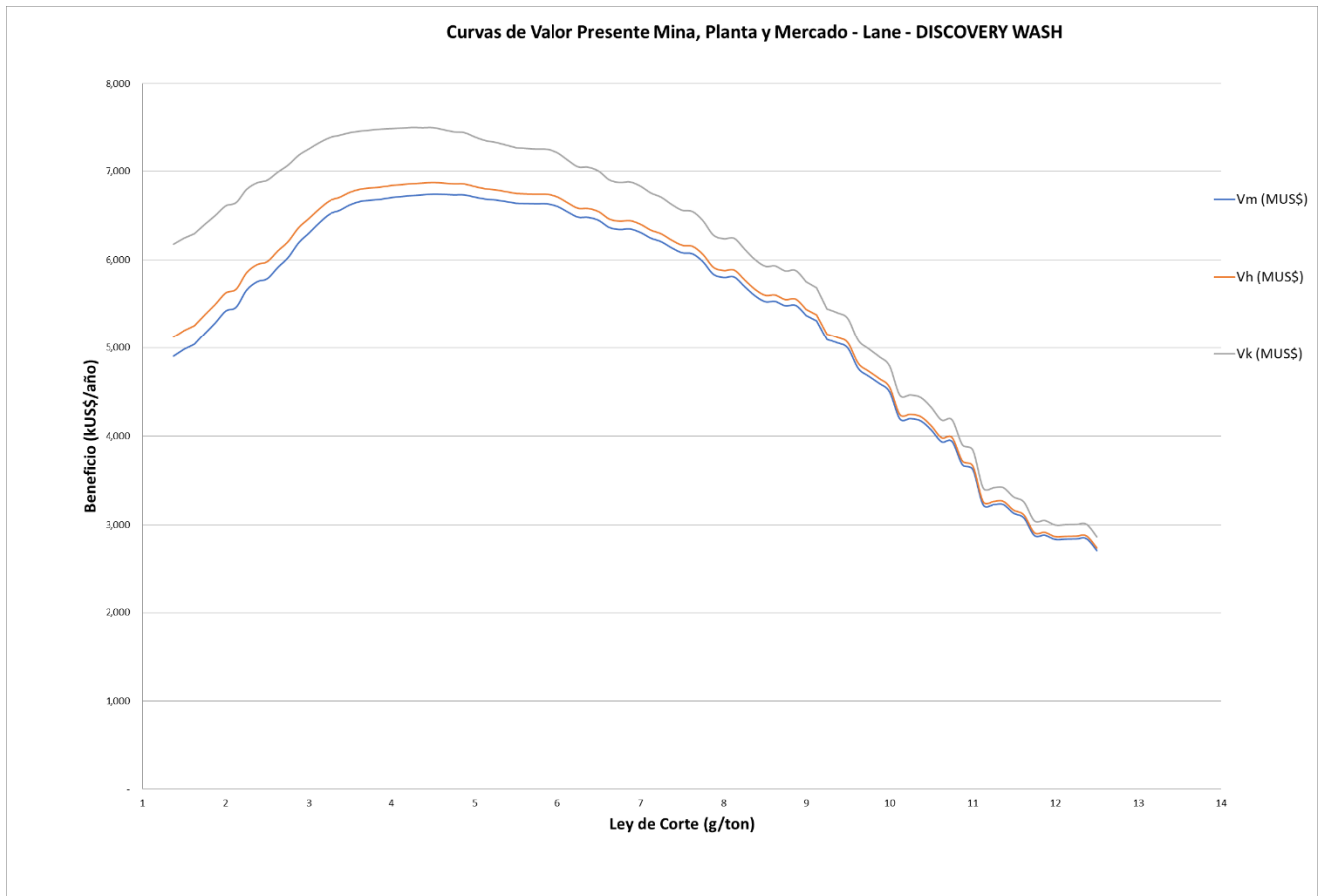
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector CMA ($L_c = 4.4$ g/ton)



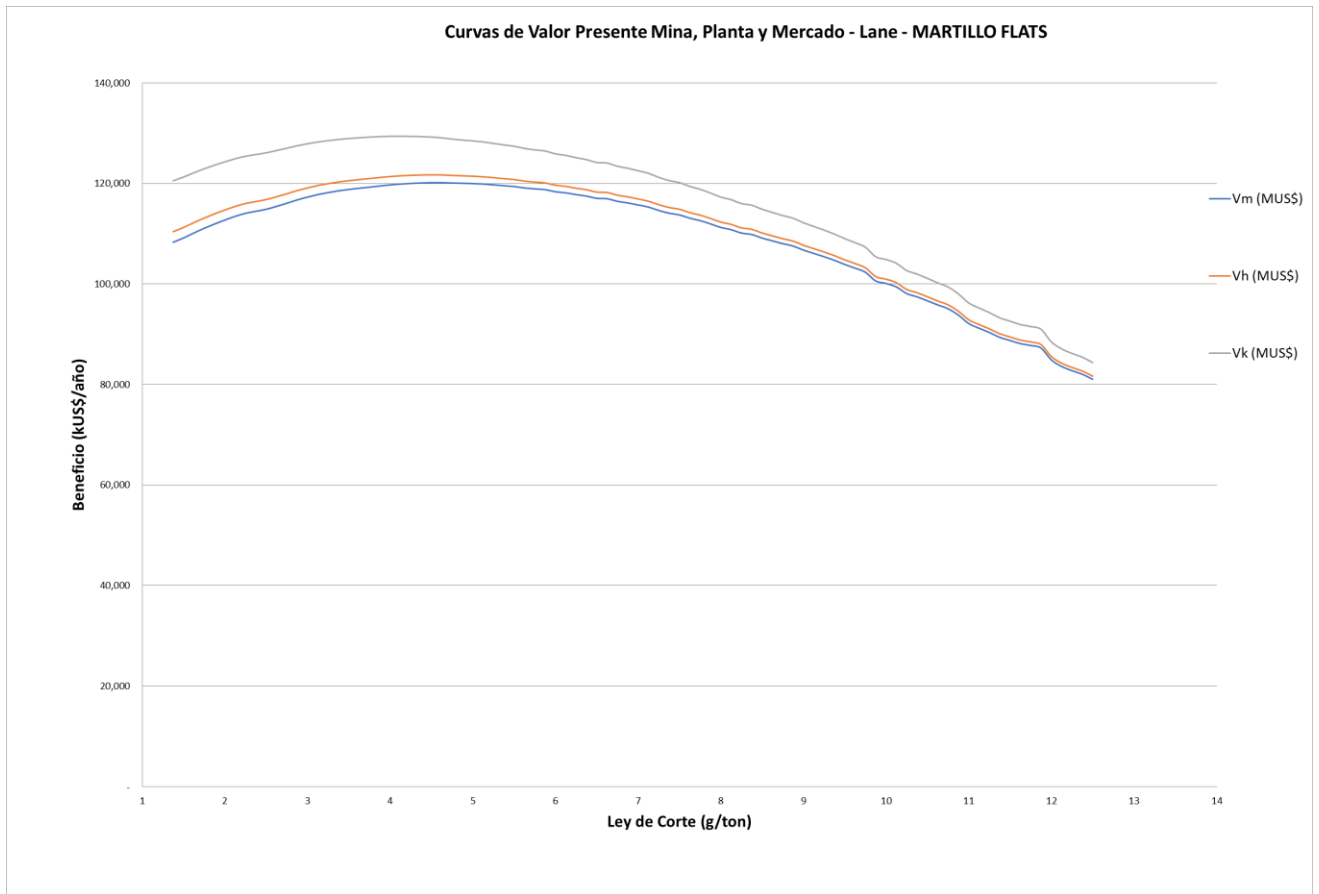
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector DOR ($L_c = 4.4$ g/ton)



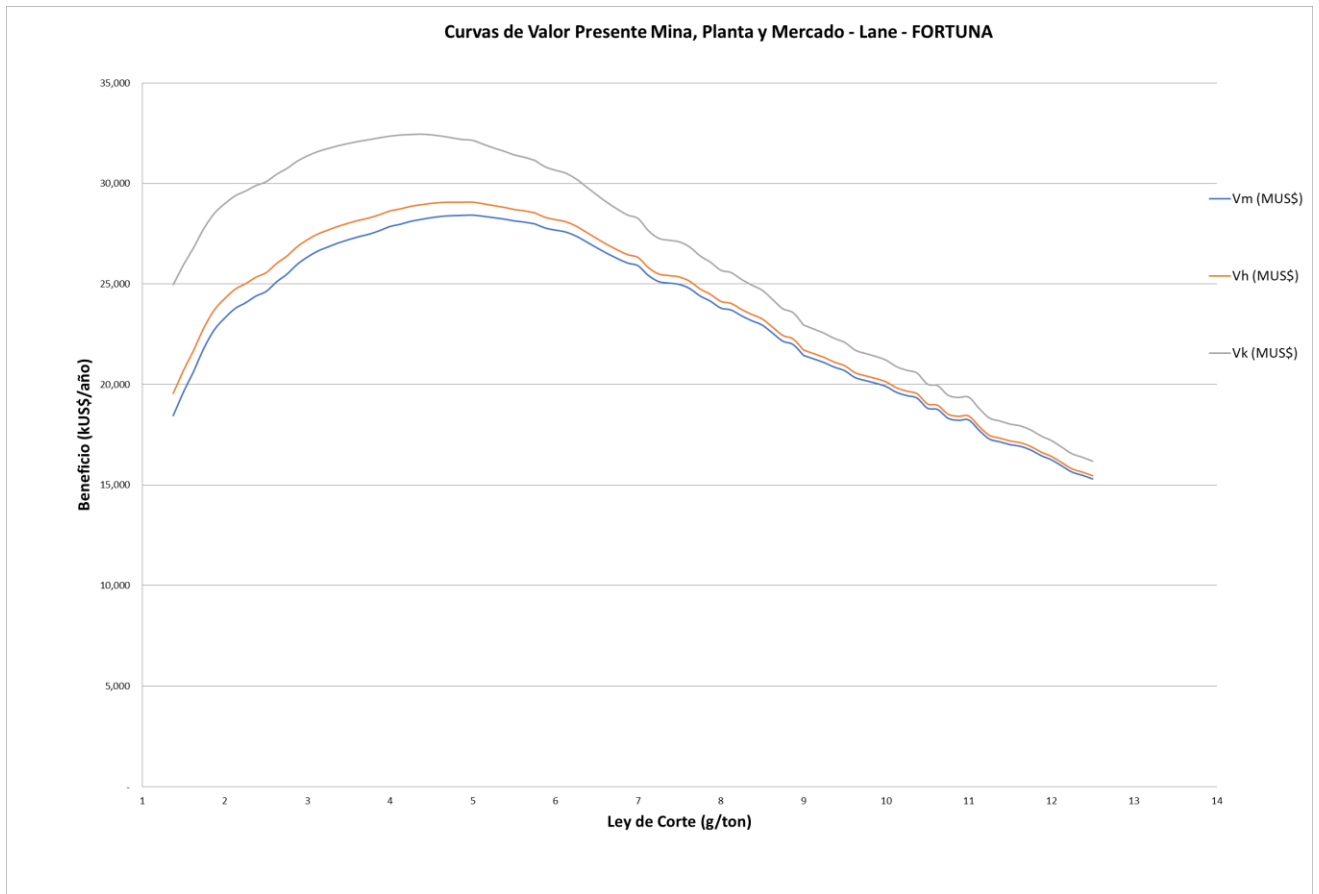
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector DWA ($L_c = 4.5$ g/ton)



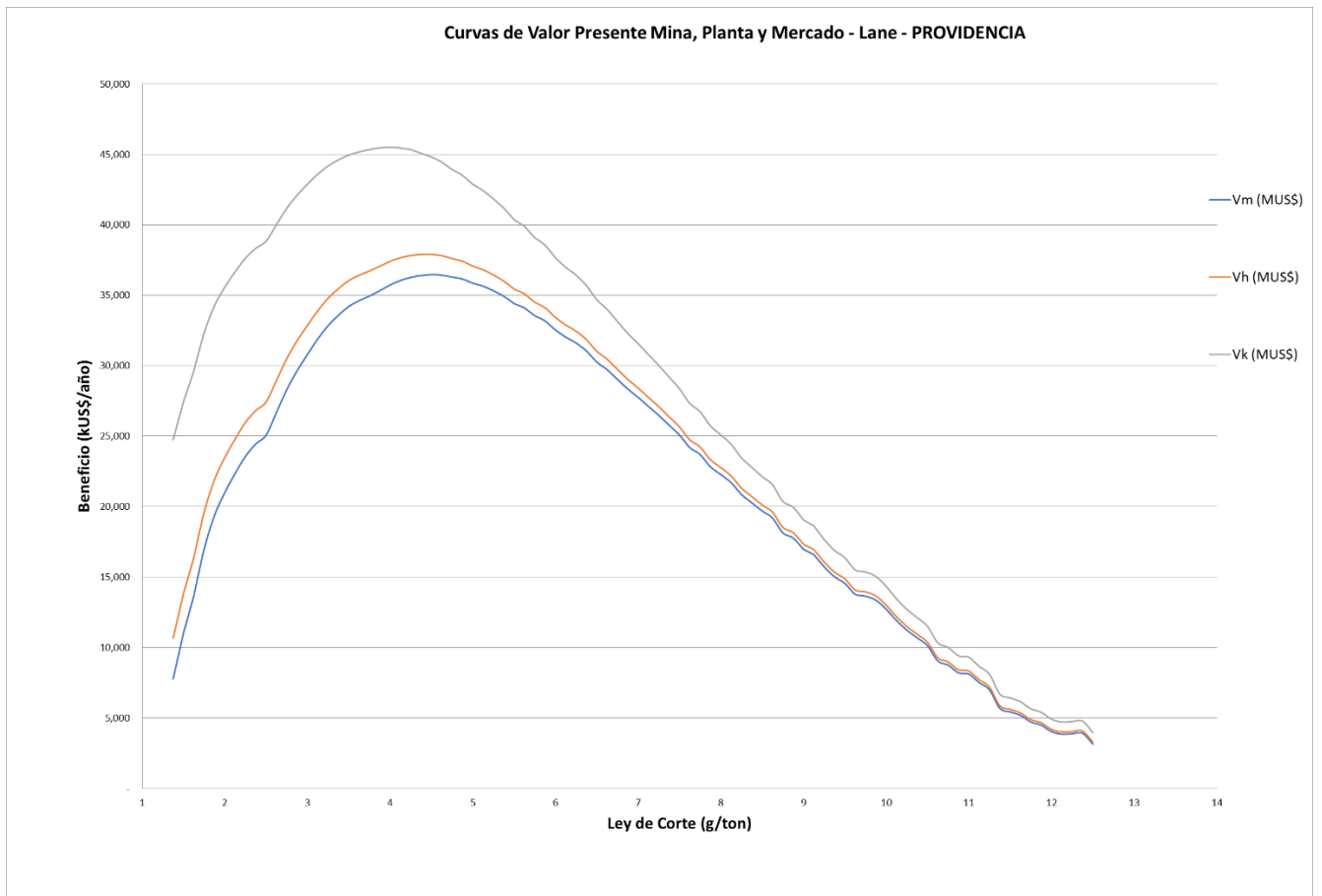
Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector FLA ($L_c = 4.6$ g/ton)



Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector FOR ($L_c = 5.0$ g/ton)



Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Sector PRO ($L_c = 4.5$ g/ton)



Curva de V_m , V_h y V_k en función de la ley de corte para obtener la ley de corte óptima según Lane – Todos los sectores ($L_c = 4.6$ g/ton)

