

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Metalúrgica

Profesor Patrocinante:

Asieh Hekmat

Ingeniero Supervisor:

Gonzalo Vergara

POTENCIALES RECURSOS DE COBALTO EN CHILE Y SU INTERACCIÓN CON ENAMI

NATALIA LAGOS VIVANCO

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

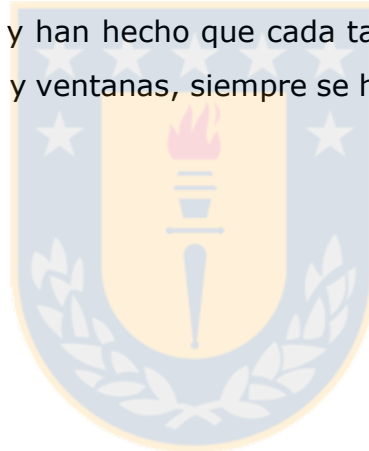
Diciembre, 2018

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quisiera agradecer a la Unidad de Innovación y Nuevos Negocios de ENAMI que me acogió al grupo de la mejor manera e hicieron que mi estadía se llenara de aprendizajes y buena energía, en especial a mi tutor Gonzalo Vergara por darme la oportunidad de formar parte del equipo y por toda su buena disposición.

A todos los profesores y profesoras que a lo largo de mi formación han entregado conocimientos y valores, me enseñaron a querer hacer las cosas bien y amar lo que uno hace, en particular a mi profesora guía Asieh Hekmat y toda su paciencia. Además, mencionar a mis padres, profesores que desde el primer día, me han educado y han formado la gran familia a la que pertenezco.

A cada una de mis amigas y amigos, que por estos seis años de experiencias me han entregado una parte de ellos y han hecho que cada tarde de estudio, informe a última hora, partido, conversaciones y ventanas, siempre se hagan con una risa y un recuerdo.



RESUMEN

La demanda actual de cobalto a nivel mundial ha aumentado considerablemente debido al fuerte desarrollo que está generando la industria de la electromovilidad. Si bien la mayor producción proviene de las reservas de la República Democrática del Congo (RDC), el déficit de oferta requiere de nuevos integrantes en el mercado, principalmente por los conflictos sociales que presenta el país.

Esta investigación forma parte del proyecto que lleva la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) por el interés en la producción de cobalto, con el objetivo de determinar el potencial de los recursos de cobalto que existen en Chile y establecer mediante un análisis económico preliminar, la posible factibilidad de explotar y procesar mineral. Se evaluaron 4 fuentes de cobalto para seleccionar la zona con mayor potencial en Chile; mineral del Distrito San Juan, relaves de la planta Vallenar y mineral del Distrito Tambillos y del Cajón del Maipo, y se aplicó el método de toma de decisión multi atributo *Analityc Hierarchy Process* (AHP) para comparar las alternativas considerando criterios cualitativos y cuantitativos; ubicación, infraestructura, cercanía, medioambiente y empleabilidad. Se elaboró una propuesta de proyecto y se realizó una evaluación económica de la zona con mayor potencial que permita procesar mineral sulfurado de cobre con contenido de cobalto en las instalaciones de ENAMI en Vallenar, la que consideró el abastecimiento de la planta de beneficio obteniendo concentrado de cobalto como nuevo producto. Se analizó el impacto de la variación de los parámetros de costos y precio mediante un análisis de sensibilidad.

Los resultados del estudio mostraron el Distrito San Juan, Freirina, como la zona de mayor interés con potencialidad en recursos de cobalto, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales de un posible proyecto de producción del metal. Se obtuvo resultados positivos del orden de 65 MUSD en cuanto a beneficios económicos esperados y, mediante el análisis de sensibilidad, se observaron beneficios incluso para los escenarios pesimistas, lo cual se traduce como una oportunidad interesante para considerar en un futuro próximo.

ABSTRACT

The worldwide current demand of cobalt has increased dramatically by a huge development of the electromobility industry. Even though the major production comes from the reserves in Democratic Republic of Congo (RDC), the lack supply requires new integrators in the market, principally because of the social conflicts that the country presents.

This research takes part of the project led by the Mining National Company of Chile (ENAMI) because of the interest in cobalt production, with the objective of determine the cobalt resource potential that exist in Chile and establish by a preliminary economic analysis, the possible feasibility of mineral exploring and processing. 4 cobalt resources have been selected and evaluated; San Juan district mineral, Vallenar plant tails, Tambillos district and Cajon del Maipo mineral, in order to choose the most potential resource, and the *Analytic Hierarchy Process* (AHP) multi-attribute decision-making method has been applied to compare several alternatives considering both qualitative and quantitative criteria; location, infrastructure, nearness, environment and employability. It was elaborated a project proposal, pre-feasibility study, that allows the processing of sulphide copper mineral with cobalt content, located at ENAMI Vallenar, which the assessments considered the supplying to benefit plant and obtaining cobalt concentrate as a new product. It was analyzed the impact of the price and cost parameters variation through a sensibility analysis.

The results of study showed the San Juan District, Freirina as the most interest zone with potentiality in cobalt resources considering the economic, social and environmental aspects of a possible metal process project. In terms of economic benefits, positives outcomes were obtained of an order of 65 MUSD and, through the sensibility analysis, it were observed benefits even for pessimistic scenarios, which are traduced in an interesting opportunity to considerer in a soon future.

NOMENCLATURA

$\Delta\%$	Variación porcentual
AHP	Proceso Jerárquico Analítico (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
CI	Índice de Consistencia (<i>Consistency Index</i>)
CR	Radio de Consistencia (<i>Consistency Ratio</i>)
CORFO	Corporación del Fomento y Producción
cUSD	Centavo de dólar
RDC	República Democrática del Congo
ENAMI	Empresa Nacional de Minería
EV	Vehículo Eléctrico <i>Electrical Vehicle</i>
EW	Electro Obtención (<i>Electro Winning</i>)
FC	Flujo de Caja
I	Inversión
IOA	Hierro-Óxido-Apatito (<i>Iron Oxide Apatite</i>)
IOCG	Hierro-Óxido-Cobre-Oro (<i>Iron Oxide Copper Gold</i>)
Lb	Libra
LIX	Lixiviación
LME	Bolsa de Metales de Londres (<i>London Metal Exchange</i>)
MADM	Toma de Decisión Multi-Atributo (<i>Multi Attribute Decision Making</i>)
Pa	Pascales
PAL	Lixiviación Ácida a Presión (<i>Pressure Acid Leaching</i>)
PIB	Producto Interno Bruto
PP	Período de Retorno (<i>Payback Period</i>)
OPEX	Costos Operacionales (<i>Operational Expenditure</i>)
RC	Costos de Refinación (<i>Refining Cost</i>)
RI	Índice Aleatorio (<i>Random Index</i>)
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SX	Extracción por Solvente (<i>Solvent Extraction</i>)
TC	Costos de Tratamiento (<i>Treatment Cost</i>)
TIR	Tasa Interna de Retorno
t	Toneladas
tms	Toneladas métricas secas
tpm	Toneladas por mes

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1.Presentación del tema.....	12
1.2.Planteamiento del problema	13
1.3.Propuesta de trabajo.....	13
1.4.Objetivos.....	14
1.4.1. General.....	14
1.4.2. Específicos.....	14
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	15
2.1.Identificación y selección zona de estudio	15
2.2.Evaluación económica	17
2.2.1 Cálculo de tonelajes.....	17
2.2.2 Indicadores económicos	18
2.3.Análisis de sensibilidad.....	19
CAPÍTULO III: ANTECEDENTES	20
3.1.Mineralogía del cobalto.....	20
3.2.Situación histórica de la minería del cobalto en el mundo	21
3.3.Situación histórica del cobalto en Chile	22
3.4.Caracterización geológica de Atacama	24
3.4.1. Depósitos minerales de cobalto en Atacama	24
3.4.2. Metalogénesis en Chile asociada a cobalto	26
3.4.3. Depósitos de mena primaria.....	27
3.4.4. Depósitos de mena como subproducto.....	29
3.4.5. Potencial en relaves	29
3.4.6. Potencial en escorias.....	31
3.5.Análisis de mercado	31

3.5.1. Recursos y reservas	31
3.5.2. Producción y oferta mundial	32
3.5.3. Demanda y países interesados	35
3.5.4. Tendencia del precio	36
3.5.5. Productos y mercados	37
3.6.Métodos de explotación y procesamiento	39
3.6.1. Métodos de explotación y extracción	39
3.6.2. Métodos de procesamiento	40
CAPÍTULO IV: DESARROLLO	43
4.1.Identificación y selección zona de estudio	43
4.1.1. Definición de alternativas de evaluación.....	43
4.1.2. Definición de parámetros a evaluar	43
4.1.3. Aplicación AHP	46
4.2.Evaluación económica	49
4.2.1. Caso planta beneficio ENAMI Vallenar.....	50
4.2.2. Cálculo de tonelajes.....	52
4.2.3. Cálculo VAN y TIR.....	52
4.3.Análisis de sensibilidad.....	54
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
5.1.Identificación y selección de la zona de estudio.....	56
5.2.Evaluación económica	58
5.3.Análisis de sensibilidad.....	61
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS	69

ANEXO 1.1: Tarifario de compra de mineral.....	69
ANEXO 2.1: Propiedades físicas y químicas del cobalto.....	70
ANEXO 2.2: Principales minerales de cobalto	70
ANEXO 2.3: Producción histórica de cobalto.....	72
ANEXO 2.4: Geología distrito San Juan	73
ANEXO 2.5: Línea de tiempo geológica	74
ANEXO 2.6: Contexto geológico	75
ANEXO 2.7: Reservas mundiales.....	76
ANEXO 2.8: Producción primario cobalto	77
ANEXO 3.1: Operaciones en de pequeña escala en Chile.	79
ANEXO 4.1: AHP	80
ANEXO 4.2: Evaluación económica	85
ANEXO 4.3: TIR.....	86
ANEXO 5.1: VAN acumulado.....	87



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1	16
Ecuación 1.2.....	17
Ecuación 1.3	17
Ecuación 1.4	17
Ecuación 1.5	17
Ecuación 1.6	18
Ecuación 1.7	18
Ecuación 1.8	18
Ecuación 1.9	18
Ecuación 1.10	19
Ecuación 1.11	19



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema metodología.....	15
Figura 2.2: Esquema procedimiento AHP.....	16
Figura 3.1: Cobaltita de Hakansboda, Lindesberg, Västmanland, Suecia.....	20
Figura 3.2: Producción mundial histórica de cobalto.....	22
Figura 3.3: Mapa ubicación yacimientos explotados de cobalto.....	23
Figura 3.4: Ubicación depósitos de cobalto en Chile.....	25
Figura 3.5: Franja ferrífera de Chile del arco magmático del Cretácico Inferior.....	28
Figura 3.6: Requerimientos energéticos según el tamaño de la reducción.....	30
Figura 3.7: Producción mundial de cobalto mina de 2008 al 2017.....	33
Figura 3.8: Producción mundial de cobalto refinado de 2008 a 2015.....	34
Figura 3.9: Evolución del mercado del cobalto última década.....	35
Figura 3.10: Precio histórico cobalto.....	37
Figura 3.11: Cobalto metálico 99.5% Co. Concentrado Co.....	38
Figura 3.12: Diagrama de flujo general de método PAL.....	41
Figura 3.13: Diagrama de flujo recuperación cobalto en relaves.....	42
Figura 4.1: Árbol de decisión.....	46
Figura 4.2: Diagrama de flujo caso de estudio.....	49
Figura 5.1: Influencia criterios.....	56
Figura 5.2: Árbol de decisión final.....	57
Figura 5.3: VAN vs. i	59
Figura 5.4: Análisis de sensibilidad 1.....	60
Figura 5.5: Análisis de sensibilidad 2.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Valor entrada según criterio	16
Tabla 2.2: Random Index	16
Tabla 3.1: Producción histórica de cobalto en Chile.....	23
Tabla 3.2: Contenido de elementos zona estudiada	26
Tabla 3.3: Reservas mundiales	32
Tabla 4.1: Resumen atributos y criterios parte <i>a</i>	45
Tabla 4.2: Resumen atributos y criterios parte <i>b</i>	45
Tabla 4.3: Valoración atributos	47
Tabla 4.4: Antecedentes planta Vallenar para mineral de Cu	50
Tabla 4.5: Antecedentes caso con proyecto	51
Tabla 4.6: Parámetros caso cobalto	52
Tabla 4.7: Evaluación económica caso base.....	53
Tabla 4.8: Evaluación económica caso cobalto	53
Tabla 4.9: VAN vs. TIR	54
Tabla 4.10: Cálculo de VAN caso +20% P_{Cu}	55
Tabla 5.1: Costos operacionales en MUSD	59
Tabla 5.2: Análisis de sensibilidad 2	61

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación del tema

Las características geológicas del Margen Andino chileno han permitido que se den distintos tipos de yacimientos de cobre como pórfidos cupríferos, *skarns*, estratoligados, *Iron-Oxide-Copper-Gold* (IOCG), de hierro como IOCG y *Iron-Oxide-Apatite* (IOA), de metales bases como skarn y vetas y metales preciosos como vetas y brechas. Esto ha generado la dependencia de la minería del cobre como principal recurso de extracción, sin embargo, la presencia de otros elementos como el oro, la plata y el molibdeno ha originado una importante producción de metales como subproductos [32].

En el último tiempo ha habido un progresivo interés en el desarrollo de nuevas tecnologías que acompañen a un estilo de vida sustentable, lo que conlleva al crecimiento de la producción a nivel mundial de elementos como el litio o el cobre, metales fundamentales para el desarrollo de la electromovilidad —*Electric Vehicle* (EV)—. Junto con el impulso de la minería del litio, ha surgido la necesidad de estudiar minerales que se requieren en la fabricación de baterías como manganeso, cobalto y/o níquel, que para el caso del cobalto se estima un crecimiento en la demanda. La importancia de estrategias de valor agregado, a la cadena productiva de recursos naturales de la oferta nacional, evidencian la necesidad de la pronta producción de litio, y con ello nuevos metales como el cobalto.

A pesar que la República Democrática del Congo (RDC) es la nación con mayor reserva y oferta de cobalto en el mundo, presenta grandes problemas sociales asociados a su extracción que en muchos casos proviene de la minería a pequeña escala, de la cual muchas operaciones son ilegales. El cobalto al tener un alto valor, existe un interés económico muy fuerte asociado a él, que en conjunto a falta de medidas regulatorias, conlleva a malas prácticas laborales tales como trata de personas y tráfico infantil por mano de obra barata. Frente a estas condiciones y la abrupta demanda de los próximos años, nace la necesidad de buscar nuevas fuentes de producción que permitan hacer crecer el mercado cumpliendo con las exigencias socio-ambientales actuales.

Se sabe que Chile mantiene una línea conservadora en cuanto a la explotación de sus recursos minerales y la participación de metales como el zinc, plomo o manganeso se han destinado únicamente a la pequeña y mediana minería. En este aspecto, el apoyo a los pequeños mineros por parte de ENAMI es primordial para desarrollar el sector de minerales no convencionales que la gran minería no abarca. En Chile ya se ha empezado a analizar la posibilidad de iniciar operaciones donde se pueda extraer cobalto para aportar en la producción mundial considerándolo como una oportunidad de expansión en el mercado de los metales.

1.2. Planteamiento del problema

El interés por estudiar la presencia de cobalto como mineral nace de la creciente proyección de la demanda y la exigua oferta para este metal, junto a la necesidad de que los procesos productivos cumplan estándares exigidos según un desarrollo sustentable.

Por otro lado, la minería convencional de metales base, como el cobre, han sesgado el desarrollo económico del país creando la dependencia de un solo elemento, que crea un mercado rígido tanto para la gran minería como la pequeña. A pesar de que esta última recoge una producción más diversa en comparación a las grandes operaciones, listando al oro y la plata, no es ajena a la necesidad de ampliar la cartera de metales que se explotan conociendo la situación geológica de Chile, que favorece el desarrollo de una importante minería polimetálica.

1.3. Propuesta de trabajo

La propuesta de trabajo consideró en primer lugar, un análisis de la minería del cobalto y su contexto a nivel mundial estudiando el impacto que tendría para ENAMI procesar este metal. Posteriormente se analizó la posibilidad de procesar cobalto mediante una línea de sulfuro, desarrollando un estudio preliminar de las zonas de interés y el potencial mineral que poseen. Se realizó una evaluación económica considerando recursos, leyes, precios y costos estimativos y aproximados.

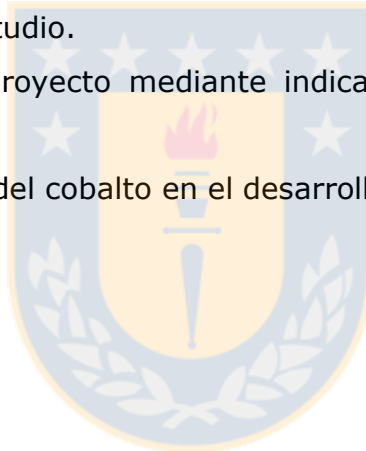
1.4. Objetivos

1.4.1. General

Determinar el potencial de los recursos de cobalto en Chile y establecer mediante un análisis económico preliminar, la posible factibilidad de ENAMI de procesar mineral de cobalto.

1.4.2. Específicos

- Estudiar la potencialidad en Chile de la zona de estudio como futuro productor de cobalto, conocer la situación histórica y actual de la minería de cobalto, en Chile y en el mundo.
- Aplicar el método de toma de decisión *Analytic Hierarchy Process* para seleccionar una zona de interés de estudio.
- Analizar factibilidad del proyecto mediante indicadores económicos y análisis de sensibilidad.
- Reconocer la importancia del cobalto en el desarrollo tecnológico, electromovilidad y sustentabilidad.



CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La metodología se basó principalmente en los siguientes tres pilares: identificación y selección de la zona de estudio mediante *Proceso Análisis Jerárquico*, evaluación económica y análisis de sensibilidad. La *Figura 2.1* muestra los procedimientos que se siguieron para obtener los resultados.

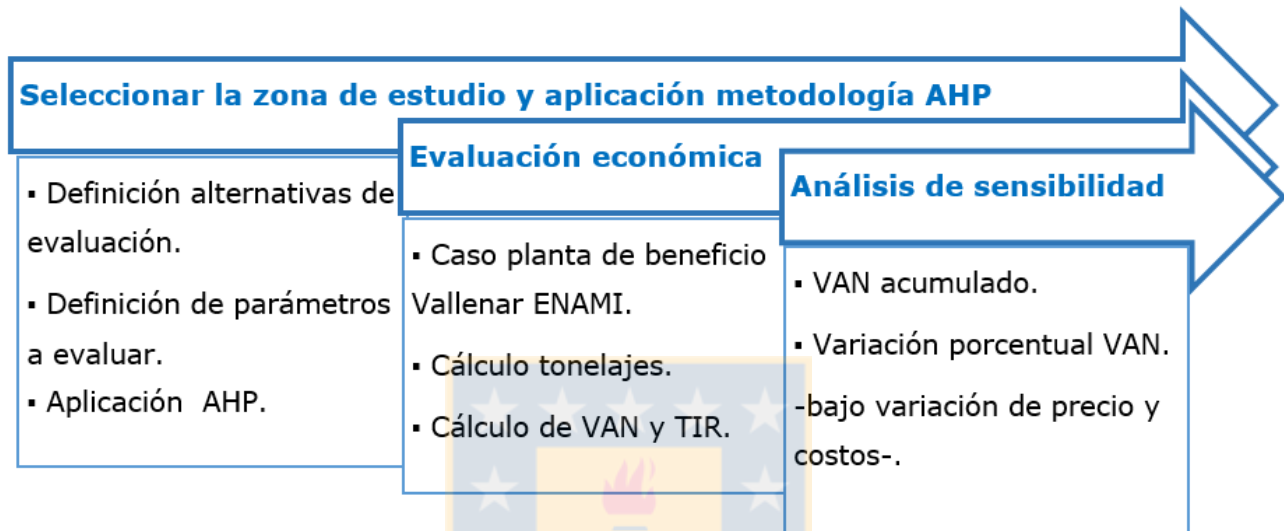


Figura 2.1: Esquema metodología.

2.1. Identificación y selección zona de estudio

Para la evaluación de alternativas de zonas de estudio se usó la teoría de toma de decisión para identificar cuantitativamente la mejor opción y se aplicó la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico —*Analytic Hierarchy Process*— de multi-atributo —*Multi-Attribute Decision Making* (MADM)—. El AHP es un método analítico propuesto para problemas que involucran un grado de incertidumbre, los cuales consideran aspectos cualitativos o paramétricos con distintas unidades de medidas, que convierte las entradas en valores numéricos y estructura el problema como una jerarquía para determinar la mejor alternativa, generando un ranking para atributos y criterios, correspondientes a las alternativas y a los aspectos que evalúan los atributos respectivamente.

Se calculó el grado de consistencia —*Consistency Ratio* (CR)— para obtener el índice de consistencia —*Consistency Index* (CI)— [26], el cual indica el grado de precisión de la jerarquía. Para el problema se procedió según los pasos de la *Fig. 2.2*:

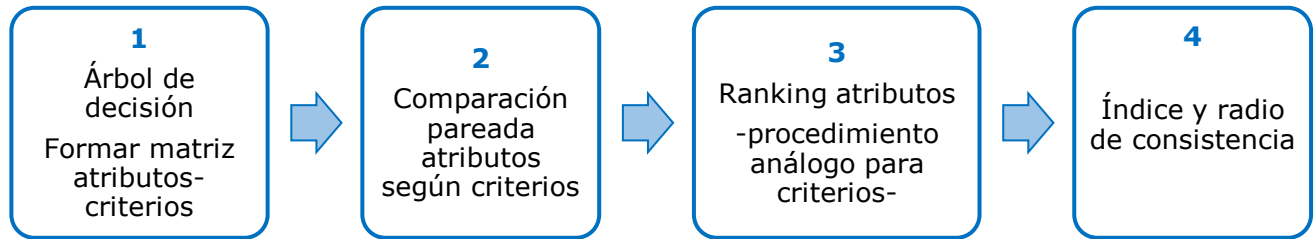


Figura 2.2: Esquema procedimiento AHP.

Para 1) (Fig.2.2), la valorización de las entradas de la matriz está dada por la *Tabla 2.1* donde el valor numérico es mayor mientras mayor relevancia tenga un atributo (o criterio) sobre otro.

Tabla 2.1: Valor entrada según criterio [26].

a_{kl}	Interpretación
1	k es igual de importante que l
3	k es poco más importante que l
5	k es más importante que l
7	k es mucho más importante que l
9	k es absolutamente más importante que l

Para 4) (Fig.2.2), el CR depende del valor propio de la matriz pareada y el *Random Index (RI)* queda definido por el orden de la matriz (*Tabla 2.2*).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \rightarrow CR = \frac{CI}{RI}. \quad (1.1)$$

Tabla 2.2: Random Index [26].

Orden matriz	RI
1	0
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
...	...

2.2. Evaluación económica

Para evaluar económicamente el caso de estudio que deriva de la selección de la zona de estudio se determinaron los tonelajes de mineral y concentrado, para posteriormente calcular los indicadores económicos correspondientes.

2.2.1 Cálculo de tonelajes

Si bien la ley de corte caracteriza la mina o planta, los ingresos se calcularon con la ley media estimada. Para determinar el beneficio anual es necesario considerar las toneladas de concentrado producidas, que dependen del tonelaje de mineral que ingresa a planta, la ley de cabeza y concentrado, además de la recuperación metalúrgica [31].

Inicialmente, se calculó el contenido de metal en el mineral por tonelada procesada:

$$\frac{\text{Contenido metal}}{\text{ton proces}} = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \cdot \text{ley metal} \left[\frac{\%}{100} \right]. \quad (1.2)$$

Se definió la cantidad de metal fino por tonelada de concentrado:

$$\frac{\text{finos}}{\text{ton proces}} = \frac{\text{Contenido metal}}{\text{ton proces}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \cdot \text{recuperación} \left[\frac{\%}{100} \right]. \quad (1.3)$$

Y por último, las toneladas de concentrado quedaron determinadas por:

$$\text{ton concen} = \frac{\text{finos}}{\text{ton proces}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \cdot \frac{\text{ton min}}{\text{ley concen} \left[\frac{\%}{100} \right]} \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{t fino}}{\text{kg fino}} \right]. \quad (1.4)$$

Una vez que se conocen las toneladas de concentrado que salen de planta, el ingreso se obtuvo aplicando la deducción metalúrgica, la cual corresponde a lo que se pierde posteriormente en refinación que debe ser pagado por la planta:

$$\text{Ingreso} = \text{Precio} \left[\frac{\text{USD}}{\text{t}} \right] \cdot \text{ton concen} \cdot \text{deducción} \left[\frac{\%}{100} \right]. \quad (1.5)$$

El cálculo de los costos depende netamente de los costos operacionales unitarios en cada operación. En el caso de ENAMI, el costo mina no existe ya que el mineral se compra directamente de los productores y el pago mediante tarifario es el que se asocia al costo de pago a mineros. El contenido puede estar medido en porcentaje, 0,1% o

1%, o en partículas por millón (10 ppm) dependiendo de cada elemento en el mineral. *Revisar ANEXO 1.1 para detalle pago mineros.*

$$\text{Costo pago mineros} = \left(\text{Precio} \left[\frac{\text{USD}}{\text{tms}} \cdot 1\% \right] - \text{Castigo} \left[\frac{\text{USD}}{\text{tms}} \cdot \text{contenido} \right] \right) \cdot \text{tms mineral}. \quad (1.6)$$

Una vez que el mineral pasa a manos de ENAMI, el costo de procesamiento de planta corresponde a:

$$\text{Costo procesamiento} = \text{OPEX} \left[\frac{\text{USD}}{\text{t}} \right] \cdot \text{ton proces}, \quad (1.7)$$

donde *Operational Expenditure* (OPEX) corresponde a costos operacionales. Además, se le agregan los costos de tratamiento que equivalen al pago por obtener únicamente concentrado sin refinar como producto:

$$\text{Costo tratamiento} = \text{TC} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] \cdot \text{ton concen} + \text{RC} \left[\frac{\text{cUSD}}{\text{lb}} \right] \cdot 2204,6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right] \cdot \text{ton concen} \cdot \text{deducción} \left[\frac{\%}{100} \right], \quad (1.8)$$

Treatment Cost (TC) y *Refining Cost* (RC) corresponden a los costos de tratamiento y costos de refinación respectivamente.

2.2.2 Indicadores económicos

Para saber qué tan rentable es implementar un proyecto, se usó el Valor Actual Neto (VAN) que es el valor presente de los flujos de caja (FC) en un periodo determinado. Para actualizar el FC anual se usó una tasa de descuento (i), medida de rentabilidad mínima exigida por el proyecto que permite recuperar la inversión, cubrir los costos y obtener beneficios [22]. En el caso de ENAMI, para un proyecto típico se considera un interés de 10%.

$$\text{VAN} = -I + \sum_{n=1}^t \frac{\text{FC}}{(1+i)^n}, \quad (1.9)$$

donde I corresponde a la inversión inicial en el periodo 0, t a la vida útil del proyecto y n al periodo actual en el que se está evaluando.

El VAN se asoció al *Payback Period* (PP) con el fin de conocer desde qué momento la planificación podría traer utilidad. Para ello, se evaluó el período en que el VAN es cero. Otro criterio que se usó es la Tasa Interna de Retorno (TIR), que corresponde a la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos del proyecto, esto es, representa el interés cuando el VAN es cero [22].

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^t \frac{FC}{(1+TIR)^n} = 0. \quad (1.10)$$

2.3. Análisis de sensibilidad

Se generaron posibles escenarios por la variación porcentual de parámetros que afectan a la evaluación económico. Para cada uno de esos escenarios se analizó el impacto para el VAN acumulado y la variación porcentual del VAN, comparando el caso base y otro supuesto.

$$\% VAN = \frac{VAN_{Caso\ supuesto} - VAN_{Caso\ base}}{VAN_{Caso\ base}}. \quad (1.11)$$



CAPÍTULO III: ANTECEDENTES

3.1. Mineralogía del cobalto

La cantidad de cobalto requerida para el desarrollo industrial es mucho menor que para otros metales como cobre o hierro, debido a que el cobalto tiene un menor grado de aplicaciones. Este fenómeno también se explica por su baja ocurrencia en estado puro en la naturaleza, aparece con concentraciones menores del orden de 25 ppm en la corteza terrestre [18].

Existe un amplio rango de minerales que contienen cobalto, pero la mayoría de ellos se encuentran concentrados en escasos depósitos minerales. Hay aproximadamente 30 minerales principales de cobalto en el mundo, cuyo contenido varía entre el 12% y 40%, y más de 100 minerales que contienen menores cantidades o cuya presencia ocurre como reemplazo de otros metales. El cobalto puede ser sustituido por metales de transición en muchos minerales, generalmente por hierro y níquel debido a su similitud. La mineralogía de cobalto se asocia principalmente a las del cobre, níquel, hierro y arsénico, y se puede encontrar como especies sulfuradas u oxidadas dependiendo del ambiente. Las altas concentraciones de cobalto que generan un interés económico se dan en distintas configuraciones, pero mayormente como sulfuros, sulfo-arseniuros y óxidos. En Chile, en términos generales, la mineralización de los yacimientos está dada por cobaltita (*Figura 3.1*) y especies de arseniuros de hierro con menor contenido de cobalto [9, 18, 32]. *Revisar ANEXO 2.1-2 para propiedades de Co y principales minerales.*



Figura 3.1: Cobaltita de Hakansboda, Lindsberg, Västmanland, Suecia (fuente: www.mindat.org).

3.2. Situación histórica de la minería del cobalto en el mundo

En sus inicios, el cobalto fue usado únicamente como colorante azul para vidrios y esmaltes por las civilizaciones persas, asirias, egipcias, chinas y griegas. Posteriormente aparece en el siglo XIV, explotado con la plata y el arsénico en su forma oxidada en Sajonia y Bohemia, de donde al parecer procede el nombre actual de cobalto, ya que los arseniatos sajones producían en los trabajadores una serie de enfermedades que los mineros atribuían a los gnomos malignos "*Kobolts*".

Para comienzos del siglo XIX los depósitos de cobalto ya habían sido encontrados por el resto de Europa en países como Alemania, Noruega, Suecia, Rumania, Francia, España e Inglaterra, y en el resto del mundo, en Chile, Argentina y Tasmania. A finales del siglo XIX, las minas de Nueva Caledonia eran la principal fuente productora de mineral oxidado de cobalto, donde se hizo conocido como "*alliage blanc*" (expresión en francés que se refiere a aleación blanca). En 1914 comienza progresivamente el uso industrial del cobalto lo que significó un aumento en la demanda, y con ello, la necesidad de descubrir nuevos depósitos minerales. Así para 1952 ya había operaciones en Marruecos, Estado Unidos, Zambia (antiguamente Rodesia del Norte), y el Congo (antiguamente Unión Minera del Alto Katanga). Después de la II Guerra Mundial, la demanda de cobalto aumentó considerablemente debido a su uso en aleaciones metálicas para la construcción de aviones y turbinas, pudiéndose suplir esta demanda con la producción de nuevos yacimientos masivos sulfurados de níquel en Sudbury, Canadá y Norilsk, Rusia. Posteriormente, empezó la explotación de cobalto como subproducto de lateritas de níquel descubiertas en Cuba.

Desde 1950 en adelante, la producción mundial de cobalto ha sido liderada por la República Democrática del Congo y Zambia, comerciándose por primera vez en 1956, el cobalto metálico con pureza 99,99%. En la década del 80, a pesar de que la producción proveniente de África comenzó a decaer drásticamente a causa de los problemas civiles, paulatinamente, fueron emergiendo nuevos yacimientos de níquel de producción secundaria de cobalto, convirtiéndose esta zona en líder mundial [14, 20].

La *Figura 3.2* muestra la producción histórica mundial del cobalto desde sus inicios proyectada hasta la década del 2020 consecuencia del aumento de la demanda global.

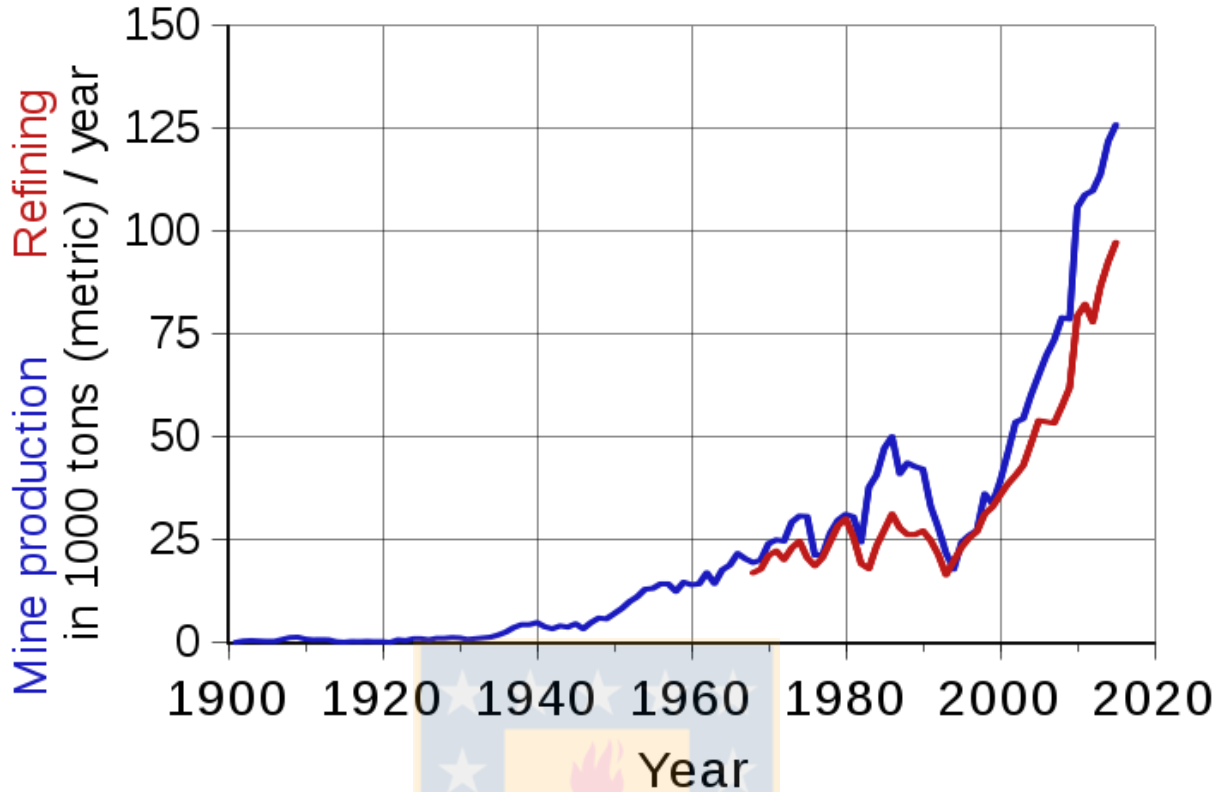


Figura 3.2: Producción mundial histórica de cobalto (fuente: U.S. Geological Survey, 2007).

3.3. Situación histórica del cobalto en Chile

La explotación de los yacimientos de cobalto en Chile comenzó a mediados del siglo XIX principalmente en las regiones de Atacama y Coquimbo. Inicialmente en las minas Buitre y Minillas en el distrito de Tambillos, en 1865 entra en la producción la zona de Huasco con explotaciones en el distrito San Juan, y posteriormente el sector de Copiapó. A pesar de que muchas operaciones fueron abandonadas, hubo una reactivación entre 1939 a 1945, periodo en el cual se extrajo unas 6.500 toneladas de mineral con leyes de entre 6% y 15% Co. La *Tabla 3.1* muestra la producción histórica del metal en Chile donde existen períodos en que no se registra producción; los años 1925 y 1940, y las temporadas de 1907 a 1923 y 1929 a 1937. *Revisar ANEXO 2.3 para detalle de producción histórica completa.*

Tabla 3.1: Producción histórica de cobalto en Chile [9].

Año	Producción [kg fino]
1844-1902	5.941.384
1903	20.376
...	...
1944	5.070
1945	1.404

Las zonas donde se ha registrado actividad minera de cobalto corresponden a las regiones de Atacama, Coquimbo, Aconcagua, Santiago y O´higgins, siendo las zonas de mayor relevancia histórica los sectores de Freirina y Huasco, Atacama [9] (Fig. 3.3).

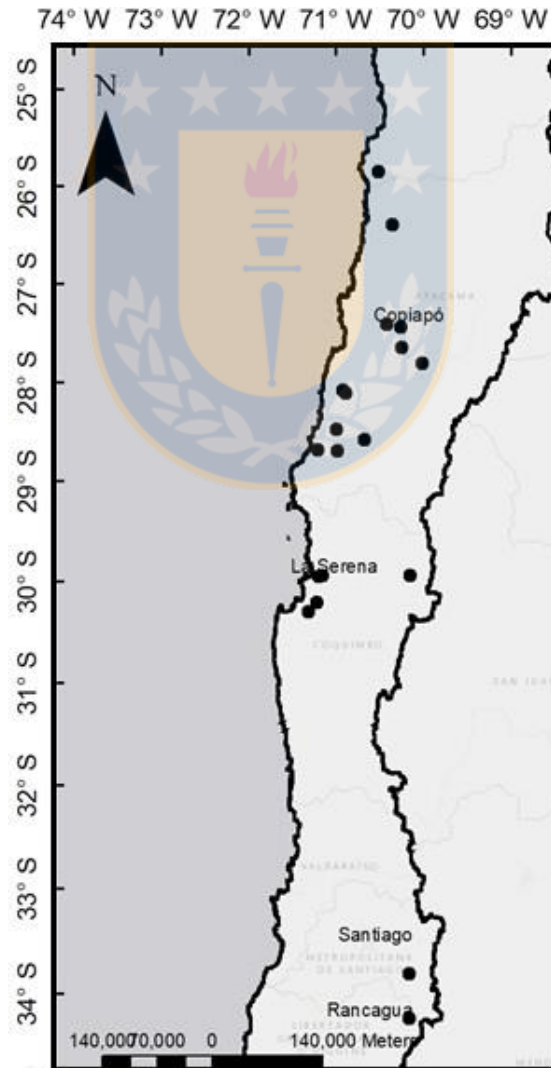


Figura 3.3: Mapa ubicación yacimientos explotados de cobalto [9].

En Chile se registran 55 yacimientos de cobalto dentro de los cuales 39 pertenecen a la región de Atacama, con ubicación en los departamentos de Chañaral, Copiapó, Vallenar, Huasco y Freirina. La mayoría cuenta con información de haber sido explotados dado que presentan labores superficiales y a poca profundidad, y también algunos restos de pequeños rajos, actualmente abandonados. En Chile actualmente no existe ninguna operación de explotación de minerales de cobalto, así como ninguna planta de procesamiento.

3.4. Caracterización geológica de Atacama

3.4.1. Depósitos minerales de cobalto en Atacama

Los depósitos de cobalto que se registran en Chile se encuentran mayoritariamente como vetas y en menor proporción como depósitos mantiformes. Estos depósitos se encuentran distribuidos a lo largo del país, pero los más relevantes se centran en la III región de Atacama, encontrando otros en el sector del Distrito Tambillos y Cajón del Maipo. En la *Figura 3.4* se puede distinguir las distintas ubicaciones de los depósitos más importantes. Por la ubicación, relevancia de los yacimientos, cercanía de operaciones de ENAMI y calidad del mineral es que Blanca-San Juan, German Riesco y Las Perdices se tornan zonas atractivas para el estudio. En estas zonas, las vetas se hospedan en rocas del basamento Paleozoico y en intrusivas, consignadas en la unidad de diorita de San Juan, que cortan el basamento. Las vetas se asocian a fallas y diques con distintas orientaciones y sentidos, dependiendo si se encuentran en el basamento o en las intrusivas.

Un yacimiento relevante en cuanto a desarrollo es Buitre, por su mina que en 1975 contaba con 3 niveles de explotación y se estimaba una ley media de 1% Co. Contiguamente se encuentra la mina Minillas, que actualmente está en preparación para la explotación de minerales oxidados de cobre.

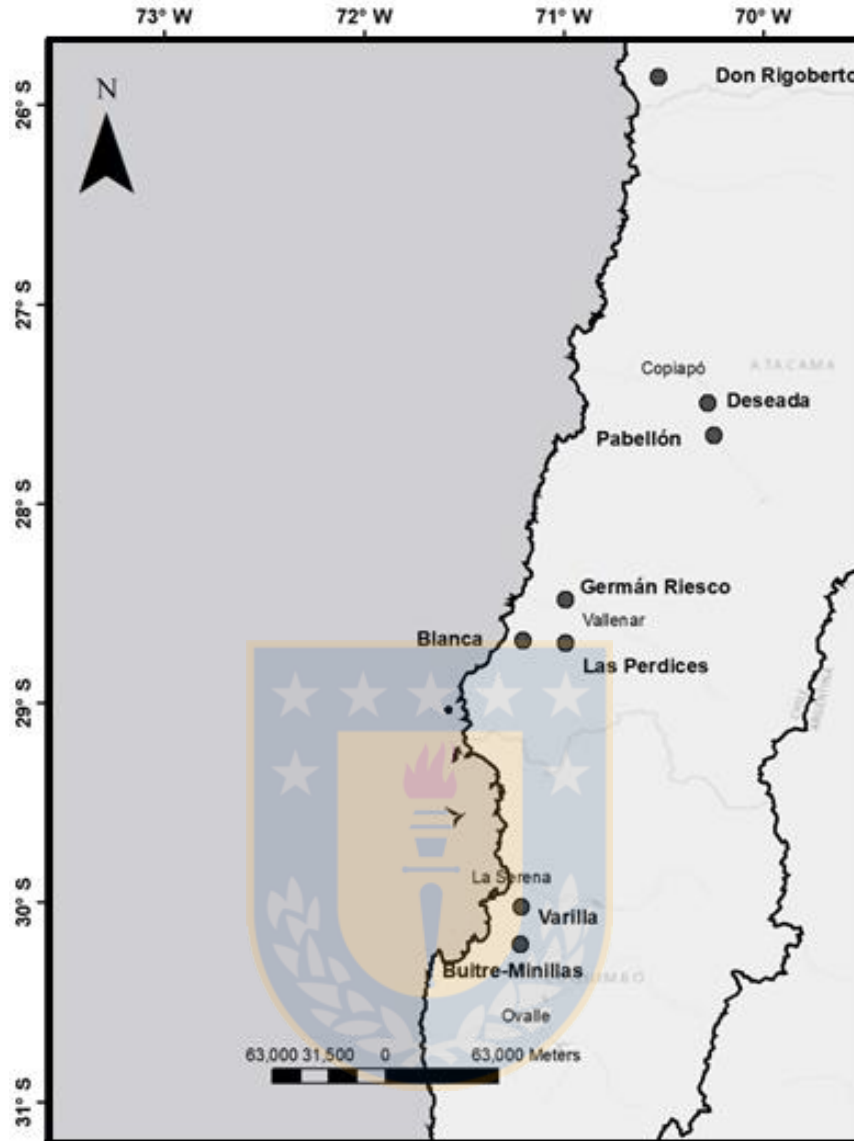


Figura 3.4: Ubicación depósitos de cobalto en Chile [15].

Describiendo la geología estructural, el basamento consiste en una formación meta-sedimentaria que presenta deformación polifásica con intensidad variable. Las vetas tienen múltiples orientaciones y manteos con potencias de entre 0,7 y 4 metros y largo de entre 80 hasta 1.000 metros. Mineralógicamente, la mena primaria consiste en piritita, cobaltita, pirrotina, calcopirita y skutterudita, y en la zona secundaria oxidada, donde hay 30 metros de desarrollo vertical, se observa la presencia de crisocola, malaquita, azurita, antlerita, eritrina y óxidos negros de cobalto. En el caso de la ganga, la mineralogía está constituida por turmalina, calcita y cuarzo, y existe en la roca caja una alteración sericita. *Revisar ANEXO 2.2 para definición de minerales.*

La *Tabla 3.2* resume la presencia de distintos elementos de interés, por análisis químico de muestras de la mena hipógena en desmontes, picados y vetas del distrito de la zona mencionada.

Tabla 3.2: Contenido de elementos zona estudiada [32].

Elemento	Contenido
Co	0,001-1,95 %
Cu	7,9-0,037%
Au	1,1-0,1 g/t
Ag	8,8-0,5 g/t
Ni	0,49-0,023%
Cd	4,7-0,023 g/t

Se recomiendan dos zonas para la exploración, una zona en el sector de la Cortadera, Paulita y Verde donde hay un contenido de 0,5% Co y otra en los sectores de Labrar, Quebradita Norte, Romero 2 y Fragueta, donde los contenidos tienen valores entre 0,1% a 0,5% Co [32]. *Revisar ANEXO 2.4 para entender geología Distrito San Juan.*

3.4.2. Metalogénesis en Chile asociada a cobalto

A partir del Jurásico Superior el Margen Andino ha evolucionado caracterizándose por la presencia de yacimientos de cobre de distintos tipos, en los que se pueden encontrar mineralización de otros elementos relevantes, destacándose los siguientes períodos [32]:

- Cretácico Inferior, se caracteriza por una metalogénesis diversa, hay desarrollo de pequeños pórfidos cupríferos en Antofagasta, Atacama y Coquimbo. En las dos últimas regiones, el arco volcánico se extiende desde el norte de Caldera al sur de Coquimbo, caracterizado por yacimientos IOA e IOCG principalmente, hospedados en el Sistema de Falla de Atacama (SFA). Cabe destacar que los depósitos IOA se explotan principalmente por mineral de hierro y los IOCG, de la misma franja, se explotan por cobre y oro, pero tienen una presencia relevante de elementos del grupo de las tierras raras —*Rare Earth Elements (REE)*—, cobalto, uranio y torio. Por la

fuerte afinidad que hay entre el hierro y el cobalto, puede que estos yacimientos presenten un potencial de cobalto como subproducto residual de la recuperación del hierro. En Chile no se ha estudiado esta ocurrencia y su potencialidad de recuperación metalúrgica.

- Eoceno Superior-Oligoceno Inferior, la evolución metalogénica se instala al este de la franja de los mega yacimientos de pórfidos de cobre-molibdeno, desde la región de Tarapacá a la de Atacama, asociada espacial y temporalmente al Sistema de Falla de Domeyko (SFD). Existe recuperación de oro, molibdeno y renio. No se ha evaluado otros elementos, sin embargo, dado los altos volúmenes de material procesado, los relaves pueden ser un blanco interesante para la búsqueda de oportunidades de ocurrencia de cobalto.
- Mioceno al Plioceno, la evolución tectónica-magmática migra a Chile Central en la región fronteriza con Argentina. En la evolución del arco ocurren yacimientos de oro en la franja de Maricunga y en la región de Atacama y Coquimbo. Más al sur, en la alta cordillera ocurren mega yacimientos de pórfidos de cobre-molibdeno hasta la región de O'higgins. Solamente el molibdeno representa un subproducto rentable, la posible ocurrencia de otros subproductos de importancia no se ha estudiado en detalle. Si bien los yacimientos ocurren principalmente entre las zonas norte y central, existen algunos polimetálicos en la región de los Lagos y de vetas, con elementos no convencionales en la región de Aysén. Además, en Magallanes, existen ocurrencias polimetálicas, interpretadas como sulfuros masivos de fondo marino o del tipo orogénico. *Revisar ANEXO 2.5-6 para entender línea de tiempo geológica y contexto geológico.*

3.4.3. Depósitos de mena primaria

Registros históricos muestran que los sectores explotados corresponden a minerales de mena primaria de cobalto, donde están presentes en sistemas de vetas hospedados en rocas metamórficas e intrusivas, como sulfosales, específicamente cobaltita, con fases de oxidación con presencia de arsenatos, específicamente eritrina. Los distritos en Atacama están asociados con la franja ferrífera espacial y temporalmente, con afinidad

a yacimientos IOCG y en menor medida a IOA. En la *Figura 3.5* se observa la ubicación de los depósitos cercanos a la franja [33].

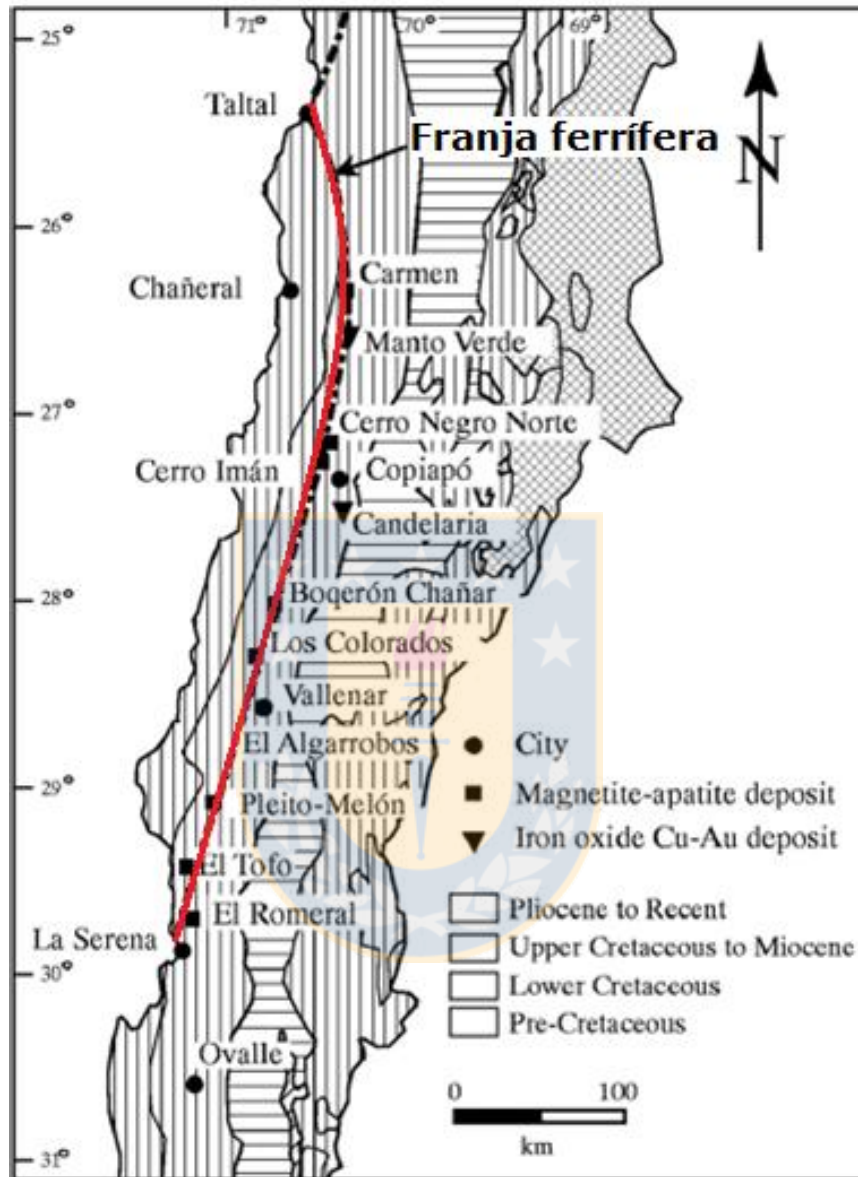


Figura 3.5: Franja ferrífera de Chile del arco magmático del Cretácico Inferior [32].

Las labores que fueron explotadas llegan a tener una profundidad de 100 m aproximadamente, y corresponden a excavaciones que siguen la dirección en que mantienen las vetas, esto indica que las vetas pueden tener una profundidad mayor a 100 m. Las leyes de las labores son cercanas al 6% Co, proveniente de la zona superficial oxidada. Sin embargo, pasando a la zona hipógena se encuentran minerales sulfurados con menores leyes [32].

3.4.4. Depósitos de mena como subproducto

La relación del cobalto al hierro y al arsénico y la evolución metalogénica del margen Andino en Chile, en ambientes hidrotermales de baja sulfuración, podrían permitir que los principales yacimientos a los cuales se puede asociar el cobalto como subproducto sean los IOCG, ocurrientes cercanos a la franja metalogénica del Cretácico Inferior. Si bien, no se reportan datos de recuperación de cobalto, puede existir un potencial no evaluado. Otros yacimientos que pudieran presentar cobalto como subproductos son los yacimientos IOA, éstos se distribuyen a lo largo del Sistema de Fallas de Atacama entre Atacama y Coquimbo. No se debe descartar la ocurrencia de minerales de cobalto asociados a los pórfidos cupríferos.

Dado que la afinidad del cobalto en sulfuros ocurre con arsénico, y que este elemento es un castigo en los concentrados de cobre, se recomendaría evaluar la posible ocurrencia de mineral en yacimientos IOA y pórfidos cupríferos. Si bien las concentraciones de cobalto pudiesen ser bajas dependiendo del mineral y la asociación al cobre o molibdeno, de ser recuperable el cobalto en un mismo proceso metalúrgico similar a lo que ocurre con el oro, pudiese representar un crédito interesante a la producción [32].

3.4.5. Potencial en relaves

En la actualidad los residuos metalúrgicos se consideran fuentes explotables de diferentes elementos de valor, por las altas leyes y la baja recuperación de otros metales como subproductos que se procesaban años atrás. Dentro de esta categoría están los relaves, en Chile se registran 718 depósitos los cuales son escasamente evaluados como activos mineros y se derivan como pasivos residuales. En la III región de Atacama, hay 167 de ellos correspondientes al 23% del total [28]. Una de las ventajas que presenta la recuperación de elementos de valor desde relaves es el beneficio de la conminución de las partículas, el mineral se encuentra liberado y/o ya reducido en tamaño, por lo que puede derivar a grandes ahorros de requerimientos de energía en el procesamiento de re-conminución. En la *Figura 3.6* se observa el requerimiento energético para la conminución según tamaño de partícula.

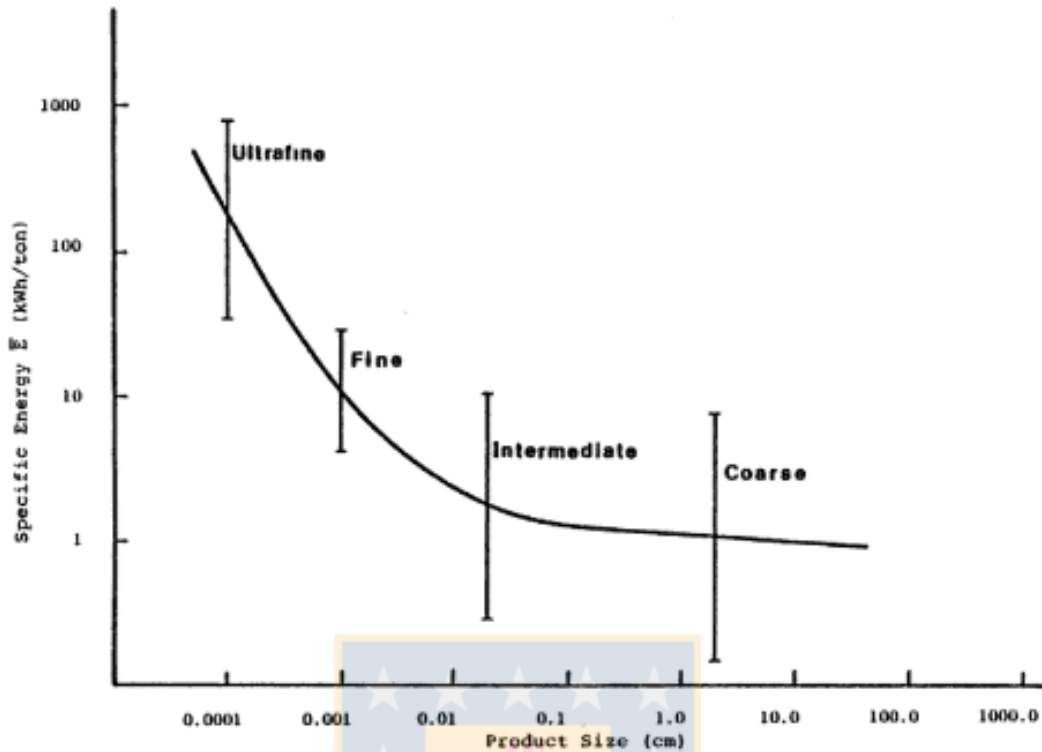


Figura 3.6: Requerimientos energéticos según el tamaño de la reducción [23].

El proceso de flotación que siguen los minerales sulfurados de cobre, oro o hierro, no tiene recuperaciones eficientes de cobalto, debido a que pasa junto a los minerales de ganga a la cola. Este es el caso para los minerales de cobalto como la pirita, pirita arsenical o arsenopirita, que son concentrados en el relave lo que hace atractivo considerarlos como fuente de explotación.

El cobalto la mayoría de las veces es subproducto de metales base como el cobre o níquel, por lo que se espera la presencia de una asociación de cobalto en los yacimientos donde se extrae cobre, sobre todo los que tienen alto contenido de sulfuros. Las leyes típicas de cobalto en yacimientos sulfuro magnéticos hidrotermales es de 0,1% [18]. Aunque se encuentren leyes de cobalto muy bajas para que sean económicamente rentables por sí solas, se podría obtener beneficios al recuperar varios elementos. No obstante, si se considera que actualmente existen depósitos de relaves que se explotan y reprocessan por otros elementos, principalmente cobre, se podría presentar la oportunidad de recuperar cobalto como un subproducto. Actualmente existen estudios para determinar elementos y minerales en relaves con potencial económico y estratégico, que podrían ser aplicados para la recuperación de cobalto [6, 32].

3.4.6. Potencial en escorias

Otra posible fuente de cobalto de interés son las pilas de escorias, formadas a partir de los residuos con alto contenido de hierro de la fundición de cobre. Dada la afinidad y seguimiento del cobalto al hierro, es probable que se encuentren importantes ocurrencias de cobalto en los botaderos de escorias. Se han abierto investigaciones sobre los contenidos de distintos elementos en escorias descartadas de fundiciones en Chile. Paipote y Ventanas son un ejemplo de ello, al haber sido estudiado las leyes y contenido de distintos elementos de interés en escorias de diferentes periodos.

3.5. Análisis de mercado

3.5.1. Recursos y reservas

Para definir el potencial económico que tiene un yacimiento, es necesario conocer los recursos y el tipo de mineralización que presenta, con el fin de poder cuantificar las reservas. Los recursos corresponden a una concentración de material de una forma, cantidad y calidad que permite apreciar su potencial técnico-económico. La ubicación, tonelaje, contenido, características geológicas y la continuidad mineralógica es estimada, conocida, o interpretada a partir de evidencias específicas, geológicas, metalúrgicas y tecnológicas [6]. Los recursos identificados de cobalto en la corteza terrestre en todo el mundo se estiman alrededor de 25 Mt, y más de 120 Mt en nódulos de manganeso en la corteza oceánica, bajo los océanos Atlántico, Índico y Pacífico [3].

Las reservas mineras son aquellas porciones del recurso, ya medido e indicado, económicamente extraíble de acuerdo a un escenario productivo, medioambiental, económico y financiero [6]. Se estima que en la corteza existen reservas de 7 Mt de cobalto, de las cuales la RDC es la nación que posee la mayor proporción en el mundo. En la *Tabla 3.3* se registran los países con las reservas más importantes de cobalto. *Revisar ANEXO 2.7 para Tabla completa.*

Tabla 3.3: Reservas mundiales [3].

País	Reservas [t]
República Democrática del Congo	3.500.000
Australia	1.200.000
Cuba	500.000
...	...
Filipinas	280.000
Zambia	270.000
...	...
Total mundial	7.100.000

En el caso de Chile, los estudios y exploraciones, que se están levantando por las distintas compañías, hacen una estimación preliminar de que en las zonas mencionadas anteriormente pudiesen existir reservas del orden de 1 a 1,5 Mt. Sin embargo, si se hace una proyección en el entorno donde la presencia de mineral oxidado predomina, se podría contener recursos de hasta de 5 Mt.

3.5.2. Producción y oferta mundial

La República Democrática del Congo continúa siendo el proveedor líder de la minería del cobalto, entregando alrededor del 58% a la producción mundial, sin embargo, la producción total proviene de unos 15 países más. Con la excepción de la producción proveniente de la minería primaria de Marruecos, equivalente al 2% de la total, y el 11% de la minería artesanal, que incluye la producción de heterogénita del Congo, la mayoría del cobalto es explotado como subproducto del cobre y níquel, aportando a la producción global el 43% y 44% respectivamente [30]. La principal determinante en los cambios de la producción de cobalto son los cambios que afectan a la producción de cobre y níquel, por la dependencia de la primera con la segunda, dejando en segundo plano la dinámica de oferta-demanda y precio.

La *Figura 3.7* muestra la producción mina global, la cual en el año 2017 fue de 110.000 toneladas. *Revisar ANEXO 2.8 para detalle por países.*

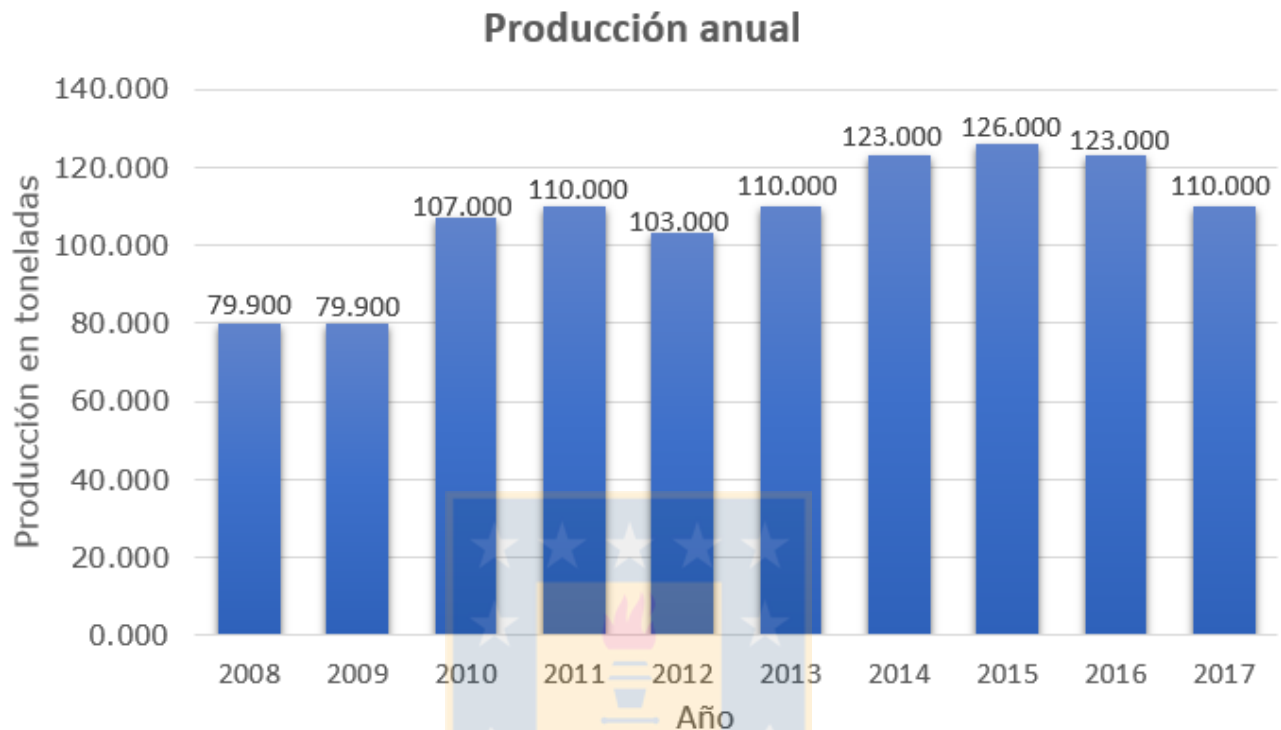


Figura 3.7: Producción mundial de cobalto mina de 2008 al 2017 (fuente: Statista, 2018).

En 2017, hubo una escasez de oferta frente a la fuerte demanda del cobalto, lo que provocó el aumento del promedio del precio y limitó la disponibilidad del metal en el mercado y la adquisición de los inversionistas. Para el corto y mediano plazo, se espera un crecimiento en la oferta, aunque a un ritmo más lento que la demanda, lo cual proyecta un déficit de suministro hasta finales de 2019.

China controla la mayor parte de la producción mundial de cobalto refinado, que depende de las importaciones de la RDC en más del 90% de su producto. A su vez, es líder mundial de consumo de cobalto, destinando aproximadamente el 80% a la industria de baterías recargables ion-litio [29]. La producción de cobalto tanto de mina como refinado aumentó en 2015 en comparación con la producción de años anteriores, gracias a países como la RDC, Cuba, Madagascar y EE. UU. para la producción mina y a China

para el cobalto refinado [3]. La *Figura 3.8* muestra la producción global de cobalto refinado los últimos años, llegando a 97.400 t el 2015. *Revisar ANEXO 2.8 para ver detalle por países.*

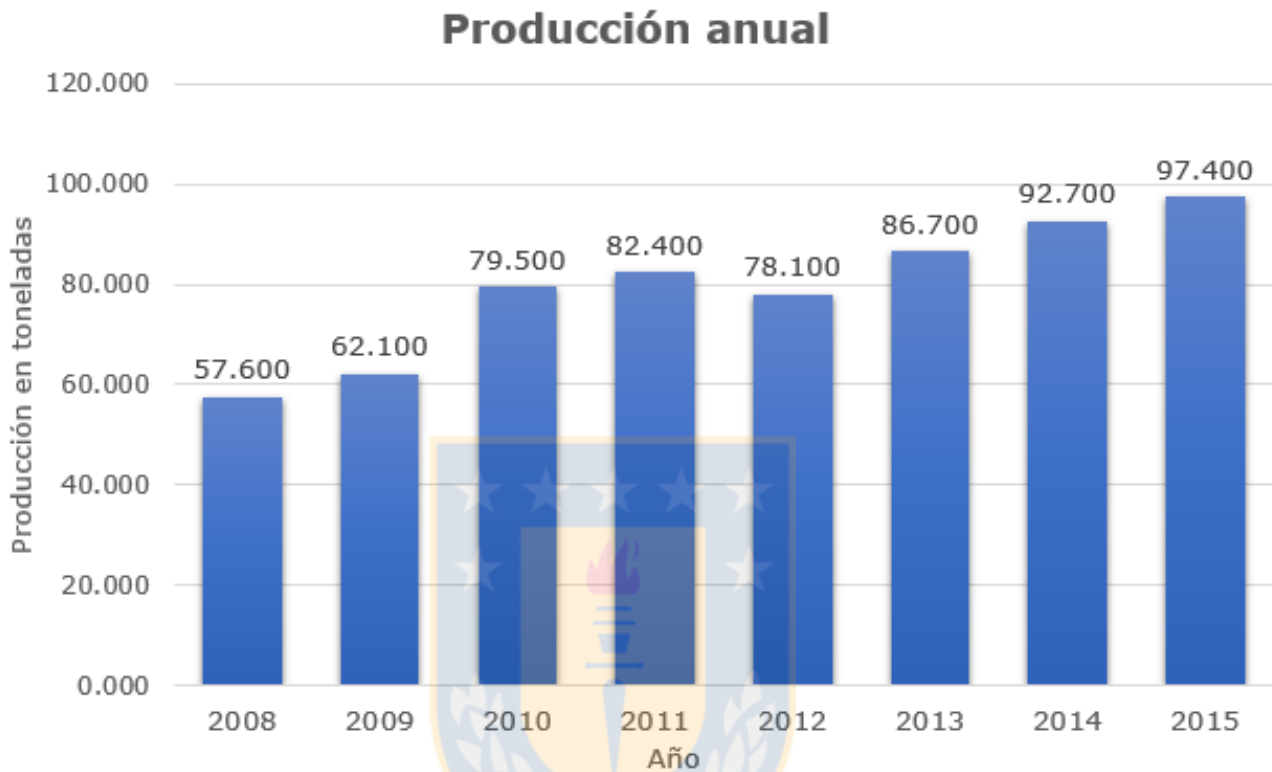


Figura 3.8: Producción mundial de cobalto refinado de 2008 a 2015 (fuente: Statista, 2018).

A pesar de que las compañías privadas de inversión extranjeras presentan políticas de explotación bajo los pilares de sustentabilidad, existen muchas operaciones artesanales que llegan a la ilegalidad. La RDC la antítesis de la estabilidad, con una historia larga y desigual que está marcada por conflictos internos, guerra civil, trabajo infantil y problemas de infraestructura. En un futuro, existe una gran probabilidad de riesgo geopolítico que provoque una importante interrupción de la producción de material de cobalto, que puede generar una grave escasez mundial de oferta de cobalto [4].

3.5.3. Demanda y países interesados

El consumo global aparente de cobalto fue de 101.500 toneladas el 2017, lo que significó un aumento aproximado del 10% comparado al año anterior. Esto a causa del incremento de un 10% en la demanda en Europa y 13% en Asia de un 13% [5]. Las expectativas de la proyección del consumo se basan principalmente en la expansión de la industria del EV y la demanda de baterías ión-litio, la cual se estima que será aproximadamente el 60% de la demanda total de cobalto para el 2020, representando un aumento del 58% desde 2016. La demanda total de cobalto excederá la cifra de 120.000 toneladas anuales para 2020 [16]. En la *Figura 3.9* se muestra el continuo crecimiento del uso del cobalto en baterías de ión-litio por sobre las otras aplicaciones en los últimos años [16].



Figura 3.9: Evolución del mercado del cobalto última década (fuente: Global Energy Metals, 2018).

Dentro de los principales consumidores del producto final, están los productores de tecnologías de teléfonos, como *Apple*, o fabricantes de automóviles eléctricos, como *Tesla* o *Volkswagen*. *Apple*, uno de los mayores consumidores de cobalto, a principios de 2018 reportó que está en conversaciones con respecto a la transparencia de la fuente de mineral que utilizan en sus productos, así como los temas sobre las operaciones ilegales y su relación con la explotación infantil [13].

Actualmente, la Bolsa de Metales de Londres —*London Metal Exchange* (LME)— no tiene normativa específica que rija el origen de la materia prima utilizada en la producción de cobalto, por lo que está adoptando procedimientos para investigar la fuente del metal para un abastecimiento apropiado [13].

3.5.4. Tendencia del precio

El cobalto se maneja como un *commodity* dentro de la categoría de los metales, al ser un recurso natural con un valor y un bajo nivel de diferenciación o especialización. Se transa en la LME desde principios del 2010, su precio es citado en USD/t y la calidad mínima del metal que se comercializa es de 99,80% Co. Se dice que las variaciones del precio de un *commodity* a lo largo de una tendencia suave reflejan que los fundamentos del mercado no son problemáticos y su comportamiento es conocido y definido. En cambio, cuando las variaciones se mantienen en el tiempo y no pueden anticiparse, generan incertidumbre y riesgo.

Los factores que afectan la volatilidad del precio son los fundamentos de oferta y demanda, mercados especulativos, globalización financiera de los *commodities*, políticas monetarias flexibles y/o expansivas, fluctuación del dólar estadounidense y aspectos geopolíticos y climáticos, que demuestran que existe una alta correlación positiva entre los ciclos de la economía global y los precios internacionales de los *commodities* [12].

La *Figura 3.10* ilustra el cambio en la cotización trimestral promedio del cobalto desde 1989 para productos de alta ley, 99,8% Co, y baja ley, 99,3% mínimo. Si bien el precio se comporta de forma constante en el corto plazo, un análisis en un período más extenso permite identificar esta variación. A lo largo de la línea temporal, se muestran los *peaks* donde el metal tuvo fuertes subidas en los años 1996, 2004, 2008 y la subida reciente de comienzos de 2018. De este último, en 2016 se notaron los primeros incrementos en el precio, por un aumento en los precios de los *multi-commodities* seguido de la fuerte participación de *Tesla* y la entrada de los *hedges funds* en el mercado para comprar el metal.



Figura 3.10: Precio histórico cobalto (fuente: Cobalt Development Institute, 2017).

En 2017, los precios medios anuales del cobalto se duplicaron con creces debido a la fuerte demanda de los consumidores, la limitada disponibilidad en el mercado y un aumento en las compras de metales por parte de los inversores. Los aspectos que se ven relacionados a este salto pueden ser la publicidad, el conocimiento técnico y el interés que se despertó en los compradores, en paralelo con los factores que afectan la volatilidad del precio [12]. El precio promedio anual de cobalto a la fecha es de 80.491 USD/t, históricamente alcanzó su máximo valor en marzo de 2018 con el valor de USD 95.250 y el más bajo en febrero de 2016 con un precio de USD 21.750 [21].

3.5.5. Productos y mercados

El cobalto es producido en forma de:

- Cobalto matte o concentrado, producto intermedio que requiere de refinación y está compuesto por una mezcla de cobalto, cobre, níquel y sulfuros de hierro. Generalmente no se venden como producto final, sino que debe continuar con la etapa de refinación.

- Productos químicos de cobalto, que se venden como óxidos, hidróxidos de alta concentración o baja concentración (con contenidos de níquel), carbonatos o sulfatos, y en menores cantidades polvos y briquetas de cobalto.
- Cobalto refinado, que consiste en el metal en estado casi puro en forma de cátodo con 99,3% a 99,8% Co (con cantidades menores de níquel, cobre y hierro). En la *Figura 3.11* se observan dos de los formatos de productos del cobalto como metal y concentrado.



Figura 3.11: Cobalto metálico 99.5% Co (izquierda). Concentrado Co (derecha) (fuente: Palm Commodities International (izda.). ALKARA (dcha.)).

El uso en estado puro del cobalto como metal es bastante limitado y se prioriza por sus propiedades físicas y químicas para potenciar el rendimiento de otros elementos, sin embargo, las aplicaciones se dividen en dos grandes segmentos; metalúrgicos y químicos. En metalurgia, se utiliza principalmente por su habilidad de generar superaleaciones capaces de resistir esfuerzos mecánicos, altas temperaturas y corrosión química, contando además con propiedades magnéticas. Su principal uso es para la elaboración de componentes aeroespaciales como motores o turbinas, protecciones, artefactos de generación o prótesis, aceros de alta velocidad *high speed steel* (HSS), herramientas de carburo y adiamantadas e imanes.

En la fabricación de componentes químicos el cobalto tiene un amplio rango de usos desde industriales hasta en la medicina, y en el sector químico, se usa como pigmentos en una gama de colores de azul a negro en vidrios, esmaltes, porcelana y cerámicas. Sin embargo, la clave está en la fabricación de baterías recargables que corresponde al

mayor consumo de cobalto, el metal perfecciona la conductividad, añade estabilidad mecánica y mejora el funcionamiento en el electrolito:

- Baterías Li-ión. Contienen relevantes cantidades con sobre 60% del cátodo compuesto de cobalto en forma de óxido de Li-Co.
- Baterías Ni-Cd. El cátodo formado de hidróxido de níquel puede contener de 1 a 5% de cobalto en forma de polvillo como óxido o hidróxido.
- Entre otras.

Su aplicación se encuentra presente en vehículos eléctricos y aparatos electrónicos como computadores portátiles, computadores, *smartphones*, etc. Otros usos están en la industria petroquímica, en agricultura o medicina [18].

3.6. Métodos de explotación y procesamiento

3.6.1. Métodos de explotación y extracción

La mayor producción de cobalto proviene de la minería del cobre y níquel como subproducto, lo que explica que las operaciones que explotan únicamente mineral de cobalto son escasas y no se categorizan como gran minería.

Para determinar qué método de explotación utilizar, los parámetros fundamentales que se evalúan corresponden principalmente a las características del yacimiento, tonelaje, ley mineral, morfología y proximidad a la superficie. Las operaciones más comunes corresponden a minería a cielo abierto para el caso de la minería masiva en que el cobalto se extrae como subproducto. Para operaciones de menor dimensión y con carácter selectivo es habitual encontrar métodos subterráneos como *Room & Pillar* (R&P), *Long Hole Retreat Stopping* (LHRS), *Cut & Fill* (C&F), etc. Sin bien estos son ejemplos generales, en la minería mundial del cobalto se pueden identificar métodos de todo tipo, incluso se conocen casos de minas artesanales.

Algunas operaciones:

- *Katanga Mining*, RDC, operación de cobre-cobalto que cuenta con la mina subterránea (R&P, LHRS, C&F) *Kamoto* y el rajo *KOV*.
- *Minara Resources*, Australia, faena de níquel-cobalto que opera en la mina a cielo abierto *Murrin Murrin*.

- *Vale Inco*, Nueva Caledonia, operación que comprende la mina de níquel-cobalto a rajo abierto *Goro*.
- *Managem*, Marruecos, mina *Bou-Azzer* de cobalto que se explota mediante *backfilled rising slices*.

3.6.2. Métodos de procesamiento

Para el tratamiento, alrededor del 20% del cobalto extraído se pierde durante el procesamiento a productos refinados y las recuperaciones varían según las técnicas de beneficio que dependen de la mineralogía, según sea arseniuro, óxido o sulfuro. Generalmente el procesamiento comienza después que el elemento primario, cobre o níquel, es recuperado. Después de la extracción, el mineral es procesado y concentrado, lo que involucra, reducción de tamaño, separación de la ganga y liberación del mineral, para aumentar el contenido de metal fino del producto. Existen tres técnicas básicas usadas en la obtención de cobalto [18]:

- Concentración por flotación.
- Pirometalurgia.
- Hidrometalurgia; incluye lixiviación (LIX), extracción por solvente —*Solvent Extraction* (SX)— y electroobtención —*Electrowinning* (EW).

La concentración permite la separación del mineral de interés y la ganga material por propiedades fisicoquímicas y el tamaño de las partículas. Uno de ellos es la flotación, proceso que consiste en adherir selectivamente las partículas del mineral de interés a burbujas de gas, aire, nitrógeno, etc., que son colectadas como concentrado. La corriente de partículas de ganga se descarta como relave.

En la pirometalurgia el calor se usa para separar los metales bases bajo diferentes puntos de fusión, densidades y otras características físicas y químicas. Este método es usado principalmente en minerales sulfurados magmáticos donde el metal se recupera de la fundición del concentrado. Comúnmente se usa la fundición flash, donde el concentrado húmedo es precalentado con aire o una mezcla de oxígeno, y se funde para producir mata líquida y slag, ganga que se mantiene en la superficie de la fase líquida.

La hidrometalurgia consiste principalmente en la separación de los metales usando sus diferencias de solubilidad y propiedades electroquímicas en solución. Una de las más comunes es la lixiviación ácida a presión —*Pressure Acid Leaching* (PAL)—, que involucra precalentamiento de la mezcla de la pulpa con ácido sulfúrico concentrado a altas temperaturas y presiones, a condiciones típicas de 255 °C y 4,4 millones Pa. Este método es el más conveniente para minerales con bajos contenidos de magnesio y aluminio. En la *Figura 3.12* se exponen las etapas del proceso PAL.

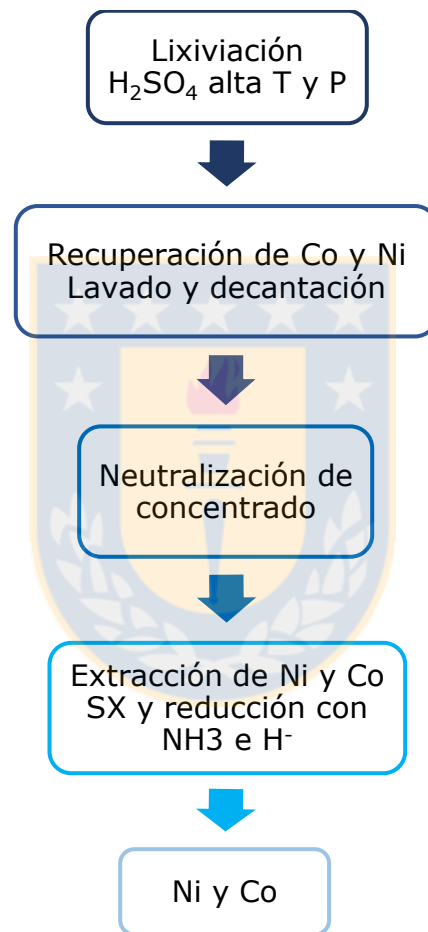


Figura 3.12: Diagrama de flujo general de método PAL [18].

Una de las tecnologías asociadas a la obtención de cobalto es la biolixiviación de sulfuros de cobre-níquel que potencialmente pueden reducir costos de operación y capitales. Los microorganismos que se utilizan en la biolixiviación para recuperar níquel y coprecipitación de cobalto son las bacterias *mesófilas* y *termófilas* tolerantes al níquel. Una aplicación de la biotecnología se asocia a la extracción de cobalto desde lateritas

por el uso de microorganismos que ayudan a la reducción del hierro, lo que promueve la disolución de las lateritas y la liberación de los metales.

Recuperación de cobalto contenido en relaves. Por antecedentes de un proyecto que evaluó la factibilidad de obtener sulfato de cobalto heptahidratado ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a partir de relaves con leyes de interés de Co, Cu y Fe, se tienen las siguientes etapas (Fig. 3.13):



Figura 3.13: Diagrama de flujo recuperación cobalto en relaves [14].

CAPÍTULO IV: DESARROLLO

4.1. Identificación y selección zona de estudio

4.1.1. Definición de alternativas de evaluación

Para la toma de decisión de la selección de la zona de interés de extracción de recursos de cobalto, se evaluaron 4 alternativas, que corresponden a los atributos, definidas por la revisión de los antecedentes. De las fuentes con contenidos de cobalto en la *sección 3.3 y 3.4* se definieron los atributos:

- Mineral a explotar sector Distrito San Juan.
- Relaves en tranque operación ENAMI en Vallenar.
- Mineral a explotar sector Distrito Tambillos.
- Mineral a explotar en sector Cajón del Maipo.

4.1.2. Definición de parámetros a evaluar

Se especificaron los criterios y sub-criterios, definidos con resguardo técnico. Considerando aspectos económicos en cuanto a costos para iniciar una operación:

- La accesibilidad apunta a la existencia de una ruta particular de transporte de faena a planta, que por normativa, el traslado de mineral e insumos debe realizarse por una vía externa a los accesos públicos. En el caso de Vallenar y Ovalle, existen operaciones de ENAMI por lo que se tratan de sectores con viabilidad de transporte a planta, sin embargo, nuevas operaciones requieren de nuevos caminos.
- El clima y humedad generan mejores o peores condiciones operacionales, la humedad quedó definida según el tipo de clima de la zona, semiárido templado con lluvias invernales, desértico marginal bajo y templado cálido con lluvias invernales respectivamente [1].
- La infraestructura caracteriza los aspectos de equipamiento y pericia de la zona, tomando en cuenta el desarrollo minero existente y lo que significa la exploración en cuanto a dificultades metodológicas, de seguridad, etc. La única zona que no

presentó un entorno minero corresponde al Cajón del Maipo, y el caso de San Juan, presenta importantes labores ya desarrolladas por explotaciones pasadas.

- La cercanía a planta es uno de los criterios más importantes por la influencia en el costo de transporte. También se considera la distancia a ciudad, la cual se considera por la cercanía de servicios. Dada la ubicación de las operaciones de ENAMI, las plantas se encuentran en las ciudades de Ovalle y Vallenar, y para la alternativa del Cajón del Maipo, no existen instalaciones de plantas de beneficio cercanas.

En cuanto al criterio ambiental, corresponde a la categoría más importante por implicancias de impactos en el entorno:

- Presencia de reservas naturales y parques nacionales cercanos, condición más importante por el impacto en zonas protegidas. Si existe una reserva natural en el sector se descarta directamente el atributo porque se considera un criterio excluyente. Se estudian zonas típicamente mineras por lo que no hay parques ni reservas en los alrededores, exceptuando el caso de la Reserva Nacional Río Clarillo en el Cajón del Maipo [8].
- Los ríos y embalses cercanos a labores mineras, se ven afectados por la disponibilidad de agua, posible agotamiento de acuíferos, contaminación por material particulado, etc. En el Distrito Tambillos se encuentra cercano el embalse Recoleta, cercano a las instalaciones de ENAMI Vallenar se encuentra el Río Huasco y en el Cajón del Maipo el Río Maipo.
- La existencia de tranque de relave cercano a la zona evaluada se valora como un aspecto positivo. Al contar con un tranque existe la ventaja de prescindir de la construcción de uno nuevo, evitando la gestión de permisos, o transporte de largas distancias de relave a otros tranques.
- La condición de humedad y viento del sector afecta en la presencia de material particulado generando polvo. Con el tipo de clima y condiciones de viento [25], se concluye que el Cajón del Maipo es la única alternativa dónde no hay levantamiento de polvo.

El criterio de empleabilidad aplica como un aspecto social en el que, si la región posee

mayores tasas de desempleo [2], un nuevo proyecto impacta de forma positiva por requerir la contratación de operarios en el sector.

En base a lo anterior, se muestra la *Tabla 4.1-2* con los atributos (*A1, A2, etc.*), criterios (*C1, C2, etc.*) y subcriterios (*C1.1, C1.2, etc.*)

Tabla 4.1: Resumen atributos y criterios parte *a*.

Criterio	Ubicación		Infraestructura		Cercanía
	C1		C2		C3
Subcriterio	Accesibilidad C1.1	Clima, humedad C1.2	Dificultad de exploración C2.1	Desarrollo C2.2	Distancia a planta C3.1
Distrito San Juan A1	Regular	Seco	Medio	Si	83 km
Tranque Vallena A2	Buena	Seco	Alto	No	1 km
Distrito Tambillos A3	Regular	Poca humedad	Medio	No	45 km
Cajón del Maipo A4	Mala	Húmedo	Alto	No	500 km

Tabla 4.2: Resumen atributos y criterios parte *b*.

Criterio	Medio ambiente			Empleabilidad	
	C4			C5	
Subcriterio	Parque C4.1	Río C4.2	Tranque C4.3	Levantamiento de polvo C4.4	Tasa de desempleo C5.1
Distrito San Juan A1	No	No	Si	Presencia de polvo	7,70%
Tranque Vallena A2	No	Río Huasco	Si	Presencia de polvo	7,70%
Distrito Tambillos A3	No	Embalse Recoleta	Si	Presencia de poco polvo	7,41%
Cajón del Maipo A4	Si	Río Maipo	No	No hay polvo	6,84%

La implementación del método AHP consistió en cuatro pasos principales y se trabajó en base a matrices de orden 8×8 y 4×4 , para los criterios y los atributos respectivamente.

Cabe mencionar que se procedió a *rankear* de forma ponderada cada atributo, dándole valor numérico a cada criterio según la *Tabla 2.1*, atribuyendo más importancia a los criterios más críticos, según *expertise* técnica profesional.

4.1.3. Aplicación AHP

Para el primer paso, se generó el *árbol de decisión* (Fig. 4.1) y se formó la matriz atributos-criterios según la valoración de la *Tabla 2.1*. El problema es dividido en partes que facilitó los cálculos e hizo que la toma de decisión evaluara todos los aspectos.

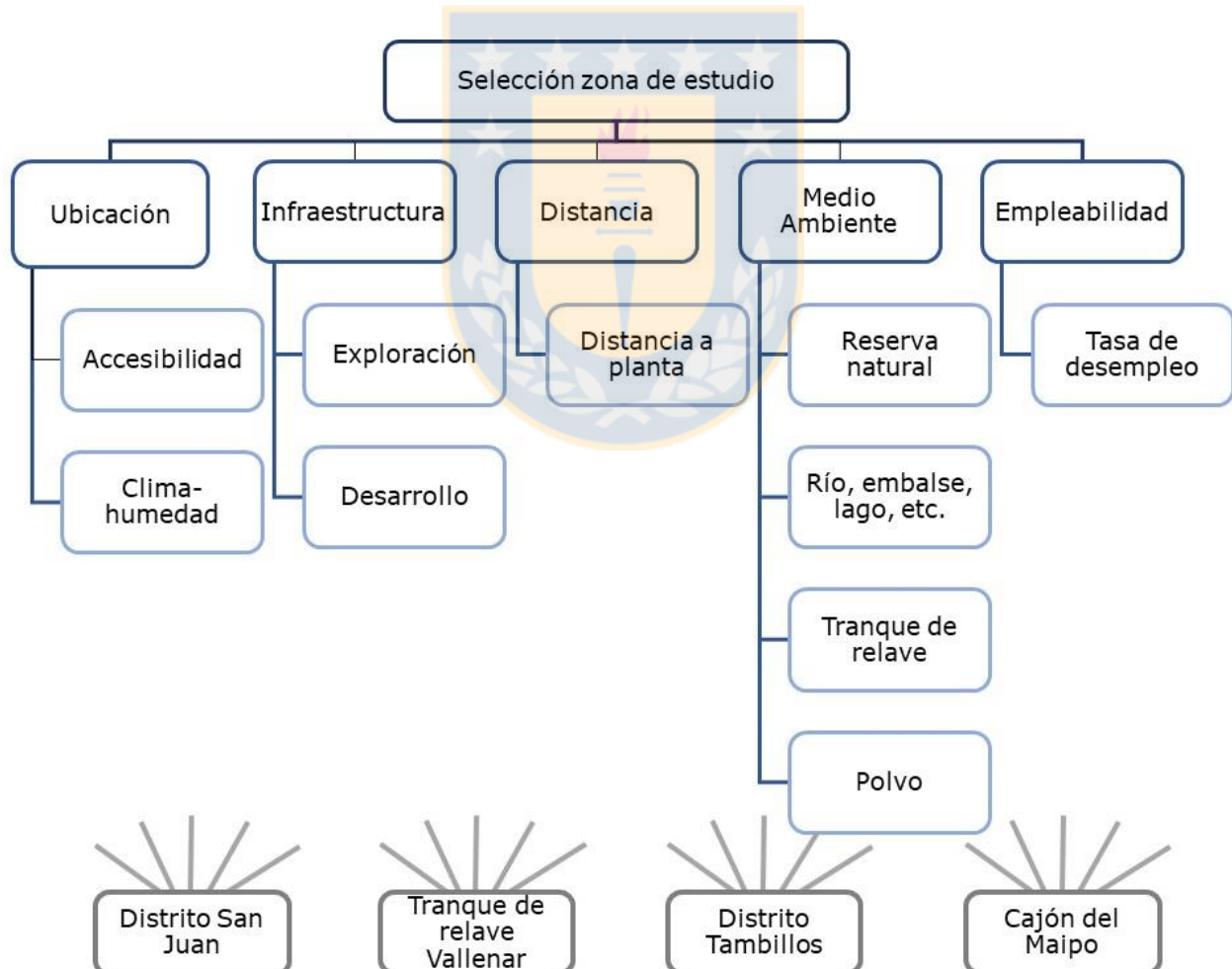


Figura 4.1: Árbol de decisión.

Notar que, para la matriz de valorización (*Tabla 4.3*) generada por los valores de la *Tabla 2.1*, el atributo *A4* quedó descartado en primera instancia porque lo caracteriza un criterio excluyente *C4.1*, correspondiente a la presencia de reservas naturales en el entorno. De esta forma, para los sub-criterios *C4.1* y *C4.3* los valores son iguales, por lo que los rankings para cada uno son equivalentes, y se descartan para no tener criterios redundantes.

Tabla 4.3: Valoración atributos.

	C1.1	C1.2	C2.1	C2.2	C3.1	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4	C5.1
	1		2		2	3				1
	2	1	1	2	1	9	7	5	1	1
A1	3	7	5	9	8	9	9	9	3	9
A2	5	7	3	1	9	9	1	9	1	9
A3	3	5	5	1	8	9	1	9	5	6
A4	±	3	±	±	±	±	±	±	9	±

Se compararon los valores asignados a los atributos de forma pareada entre ellos, por cada criterio, se generaron las matrices de comparación pareada B_i y se obtuvieron ocho matrices de orden cuatro, una por cada criterio y cada orden por cada atributo.

Matriz pareada B_5 , según criterio *C3.1* "Distancia a planta".

$$B_5 = \begin{matrix} & A1 & A2 & A3 \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 8/9 & 1 \\ 9/8 & 1 & 9/8 \\ 1 & 8/9 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Se generó la matriz de puntajes de atributos. Las matrices pareadas se normalizaron para eliminar la unidad de medida y promediaron por fila para obtener el vector *ranking*. La normalización viene de la razón entre cada entrada b_{ij} dividida por la suma de los valores de los atributos de cada columna j , demostrado por la suma de las entradas de cada columna es 1.

$$\rightarrow \overline{B_{5_1}} = \begin{bmatrix} 0,32 & 0,32 & 0,32 \\ 0,36 & 0,36 & 0,36 \\ 0,32 & 0,32 & 0,32 \end{bmatrix}.$$

Se creó la matriz S , dónde cada columna s_j representa el *ranking* promedio del atributo i según el criterio j .

$$s_5 = [0,32 \quad 0,36 \quad 0,32]^t.$$

Reiterando los pasos anteriores se obtuvo la matriz de puntajes para cada atributo por cada criterio.

$$S = \begin{matrix} & C1.1 & C1.2 & C2.1 & C2.2 & C3.1 & C4.2 & C4.4 & C5.1 \\ A1 & [0,27 & 0,37 & 0,29 & 0,82 & 0,32 & 0,33 & 0,33 & 0,38] \\ A2 & [0,46 & 0,37 & 0,41 & 0,09 & 0,36 & 0,24 & 0,11 & 0,38] \\ A3 & [0,27 & 0,26 & 0,29 & 0,09 & 0,32 & 0,43 & 0,56 & 0,25] \end{matrix}$$

Para calcular el vector *peso* w , *ranking*, de los criterios, se procedió de la misma forma que en los pasos anteriores para los criterios. En este caso, la matriz de comparación deriva del valor asignado a cada criterio y subcriterios correspondientes.

$$\begin{aligned} \text{Vector peso } w &\rightarrow [C1.1 \quad C1.2 \quad C2.1 \quad C2.2 \quad C3.1 \quad C4.2 \quad C4.4 \quad C5.1]^t. \\ &= [0,07 \quad 0,04 \quad 0,07 \quad 0,15 \quad 0,22 \quad 0,29 \quad 0,04 \quad 0,11]^t. \end{aligned}$$

Por último, se multiplicó la matriz S por el vector w y se obtuvo el *ranking* final. Se ordenó de mayor a menor para discriminar las alternativas con menor puntaje.

$$S \cdot w = \begin{bmatrix} 0,27 & 0,37 & 0,29 & 0,82 & 0,32 & 0,33 & 0,33 & 0,38 \\ 0,46 & 0,37 & 0,41 & 0,09 & 0,36 & 0,24 & 0,11 & 0,38 \\ 0,27 & 0,26 & 0,29 & 0,09 & 0,32 & 0,43 & 0,56 & 0,25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,07 \\ 0,04 \\ 0,07 \\ 0,15 \\ 0,22 \\ 0,29 \\ 0,04 \\ 0,11 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,40 \\ 0,29 \\ 0,31 \end{bmatrix}.$$

Los resultados de la matriz mostraron que para $A1$ se obtuvo el mayor peso.

Cuando se tienen muchas comparaciones y las matrices son de rangos muy grandes, se pueden tener inconsistencias que le bajan el grado de precisión al método. Considere el caso en que el *criterio 1* es poco más importante que el *criterio 2* y el *criterio 2* poco más importante que el *criterio 3*, la inconsistencia surge si el *criterio 3* es mucho más importante que el *criterio 1*. Para comprobar la consistencia se calculó el CR, se aplicó el índice de consistencia CI (ecuación 1.1), donde λ_{max} corresponde al máximo valor propio de la matriz comparación y n el número de atributos. Para estimar el valor propio

se multiplicó B_i por s_i , luego se dividió por s_i y se obtuvo el promedio de los factores de ese vector.

Para B_5 :

$$\lambda_{\max B_5} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0,89 & 1 \\ 1,13 & 1 & 1,13 \\ 1 & 0,89 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,32 \\ 0,36 \\ 0,32 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,96 \\ 1,08 \\ 0,96 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0,96 \\ 1,08 \\ 0,96 \end{bmatrix} \div \begin{bmatrix} 0,32 \\ 0,36 \\ 0,32 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix} \rightarrow \lambda_{\max} = 3 - 3 = 0.$$

Radio de consistencia:

$$CI = \frac{0 \times 3}{3 - 1} = 0 \rightarrow CR = \frac{CI}{0,58} = 0,$$

donde RI corresponde al índice *random* de la *Tabla 2.2*, que depende al orden de la matriz, que en el caso de una de 3×3 corresponde a 0,58. *Revisar ANEXO 4.1 para evaluación completa.*

4.2. Evaluación económica

Se creó un caso de estudio asignando a la zona de estudio la planta de beneficio más cercana de la empresa y se limitó a supuestos.

- Se consideró el procesamiento de minerales sulfurados de cobre con contenido menor de cobalto. Esto conllevó a evaluar la línea de concentración por flotación primero al cobre y posteriormente al cobalto, si bien no se especificó el método puntual de procesamiento se asumió una flotación selectiva, con consiguientes costos marginales menores. En la *Figura 4.2* se presentó el diagrama de flujo global del caso de estudio, dentro del procesamiento se abarcan las operaciones unitarias de reducción de tamaño, concentración, espesamiento, etc.



Figura 4.2: Diagrama de flujo caso de estudio.

- Los productos de venta se limitan a concentrado de cobre y concentrado de cobalto prescindiendo de la fundición. De la misma forma el precio de venta depende únicamente a la ley del concentrado que se tenga por lo que se trabajó bajo el supuesto de la recuperación y ley de concentrado de cobalto.
- Existe una diferencia entre la capacidad máxima de la planta y la capacidad actual a la que está operando, lo que genera un desabastecimiento que se revirtió alimentando con mineral Cu-Co. Así, se tuvo una producción original base del mineral procesado actual y una producción de mineral Cu-Co.
- Con respecto al pago de mineral, se asumió que se generó una tarifa de compra para el cobalto. Esta tarifa se consideró como bono al contenido de cobre, no como mineral primario, por lo que el costo de compra para el cobre es mayor que para el cobalto y hay un pequeño margen de pago por este último.
- El costo capital se valoró en dos periodos desde el desarrollo del proyecto. En base a una asunción de inversión, para el primer año se apuntó un costo inicial base de 1 MUSD que se adhirió a la del segundo año de inversión de 5 MUSD. Costos estimativos que incluyen la ingeniería de pre-factibilidad, factibilidad, instalación y puesta en marcha de la planta.

4.2.1. Caso planta beneficio ENAMI Vallenar

Una vez definido el sector de evaluación, se le asoció la planta de beneficio ENAMI Vallenar. Los indicadores de la planta están definidos por la *Tabla 4.4*.

Tabla 4.4: Antecedentes planta Vallenar para mineral de Cu.

Parámetro	Unidad	Valor
Capacidad de planta	Tonelada por mes	22.000
Ritmo actual	tpm	5.000
Abastecimiento	%	23
Ley Cu mineral de entrada	%	1

Continuación *Tabla 4.4:*

Parámetro	Unidad	Valor
Costo mineral	USD/t	10,91
Costo chancado	USD/t	6,80
Costo operacional	USD/t	23,94
Costo fundición	USD/t	150
Costo refinación	cUSD/lb	15
Deducción metalúrgica	%	3,5
Ley concentrado	%	23,1
Recuperación	%	88,54

Se presentan dos escenarios: *sin proyecto*, que corresponde a la situación actual de la planta y *con proyecto*, que corresponde al *caso cobalto* en que la planta incorpore el procesamiento de cobalto, abastecida al 100% de su capacidad, donde la diferencia de tonelaje por el ritmo actual se alimenta con mineral de cobre-cobalto. Los parámetros se estiman (para el cobalto) y redondean (para el cobre) para tener un mejor manejo de números que quedan definidos en la *Tabla 4.5*.

Tabla 4.5: Antecedentes caso con proyecto.

Parámetro	Unidad	Cu	Co
Precio venta	USD/t	5.700	80.500
Ley mineral	%	1	0,30
Ley de concentrado	%	25	12
Recuperación	%	90	50
Mineral procesado	t	21.740	16.800

Cabe aclarar que los precios de concentrados se determinaron en base al precio promedio anual a la fecha y la ley permisible de venta. La ley de mineral se estimó en un escenario pesimista y solo para dar orden de magnitud, ya que aún no hay resultados de carácter absoluto de exploraciones o por análisis químico de ley de mineral de entrada. Es posible que se encuentren mayores leyes reales y una variación en la ley

mineral, por lo que para el desarrollo del proyecto se debe considerar el *stockeo* por calidad y tipo de mineral. La recuperación de concentrado de cobalto puede variar en un rango entre 30 a 80% según valores típicos y se consideró un valor medio [17]. Los costos de tratamiento y refinación se asumieron por referencia de costos de fundición del cobre, los que se pagan en la venta de concentrado.

4.2.2. Cálculo de toneladas

Bajo los antecedentes (*Tabla 4.6*) se calculó el tonelaje de concentrado del contenido mineral (*ecuación 1.2-4*), los ingresos (*ec. 1.5*) y costos totales (*ec. 1.6-8*) para la evaluación económica del caso actual y el caso cobalto. Para el OPEX se consideró un incremento anual de 1% desde el año 2023 que repara en depreciación, desgaste de equipos, contratación de más personal, compra de mayores insumos, aumento en distancias de transporte, etc.

Tabla 4.6: Parámetros caso cobalto.

		Cu	Co
Concentrado	t	782,61	209,24
Precio concentrado	USD/t	1.432	9.659
Ingreso	USD/mes	1.081.660	1.950.288
Pago mineros	USD/mes	237.133	182.593
Costo chancado	USD/mes	147.875	-
Costo procesamiento	USD/mes	520.355	334.783
TC	USD/mes	117.391	37.663
RC	USD/mes	249.743	80.126
OPEX	USD/mes	1.272.498	635.164

4.2.3. Cálculo VAN y TIR

La vida útil se proyectó a 10 años desde la puesta en marcha y se calcula el VAN (*Tabla 4.7-8*) según la *ec. 1.9*, donde *I* es la inversión que se paga a dos años, *FC* el flujo caja

anual, n el período en el que se evaluó cada FC y la tasa de descuento corresponde al 10%. Revisar ANEXO 4.2 para evaluación completa.

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^{10} \frac{FC}{(1 + 0,1)^n} = 65,41 \text{ MUSD}$$

Tabla 4.7: Evaluación económica caso base.

Sin proyecto		2020	2021	2022	...	2031
Ingreso por Cu	MUSD/año	2,99	2,99	2,99	...	2,99
Costo Cu	MUSD/año	3,51	3,51	3,51	...	3,51
Flujo caja	MUSD/año	-0,05	-0,05	-0,05	...	-0,05

Tabla 4.8: Evaluación económica caso cobalto.

Con proyecto		2020	2021	2022	...	2031
Ingreso por Cu	MUSD/año	2,99	2,99	12,98	...	12,98
Ingreso Co	MUSD/año	-	-	23,40	...	23,40
Con proyecto		2020	2021	2022	...	2031
Costo Cu	MUSD/año	3,51	3,51	15,27	...	16,64
Costo Co	MUSD/año	-	-	7,39	...	8,05
I	MUSD/año	-1,00	-5,00	-	-	-
Flujo caja	MUSD/año	-1,07	-5,07	13,73	...	11,69
VAN	MUSD	65,41				

Otro de los indicadores que se valoró es la TIR (ec. 1.10). Se hizo una evaluación para una tasa de interés en un rango de 10 a 250% (Tabla 4.9) y se determinó cuando el VAN pasa de ser un valor positivo a uno negativo. Revisar ANEXO 4.3 para evaluación completa.

Para una tasa de interés de 146,5%:

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^{10} \frac{FC}{(1 + 1,47)^n} = -0,01 \text{ MUSD}$$

Tabla 4.9: VAN vs. TIR.

Tasa de interés [%]	VAN [MUSD]
0	120,02
10	65,41
20	39,39
...	...
130	0,60
140	0,21
146,5	-0,01
150	-0,12
...	...

4.3. Análisis de sensibilidad

Se consideraron distintos escenarios según la variación de -20%, -10%, +10% y +20% de los parámetros:

1. Precio, análogo a la variación de la recuperación y la ley:
 - a. P_{Cu} , variación únicamente precio del cobre.
 - b. P_{Co} , variación únicamente precio del cobalto.
 - c. P_{Cu-Co} , variación de precio de ambos metales.
2. Costo:
 - a. C_{Cu} , variación únicamente del OPEX del cobre.
 - b. C_{Co} , variación únicamente del OPEX del cobalto.
 - c. C_{Cu-Co} , variación del costo de ambos metales.

Se obtienen siete curvas, de los escenarios enunciados y del caso base en el que no se ve afectado por ningún parámetro. La comparación se determinó en razón porcentual entre el caso sensibilizado y el caso base (ec. 1.11), para todos los escenarios se calculó la variación porcentual del VAN ($\Delta\%$ VAN) en base a la variación porcentual de cada parámetro ($\Delta\%$). Para el escenario 1.a (Tabla 4.10):

El precio de venta base del concentrado de cobre es 1718,7 USD/t.

$$\%VAN = \frac{VAN_{P_{Cu+20}} - VAN_{Caso\ base}}{VAN_{Caso\ base}} \cdot 100 = \frac{79,91 - 65,41}{65,41} \cdot 100 = 22,17\%$$

Tabla 4.10: Cálculo de VAN caso +20% P_{cu}.

		2020	2021	2022	...	2031
Ingreso por Cu	MUSD/año	2,99	2,99	15,58	...	15,58
Ingreso Co	MUSD/año	-	-	23,40	...	23,40
Costo Cu	MUSD/año	3,51	3,51	15,27	...	16,64
Costo Co	MUSD/año	-	-	7,39	...	8,05
I	MUSD/año	-1	-5	-	-	-
Flujo caja	MUSD/año	-1,53	-5,53	16,33	...	14,28
VAN	MUSD	79,91				



CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En base al desarrollo del capítulo anterior, se obtuvieron los resultados de la metodología AHP y la evaluación económica; VAN, TIR y análisis de sensibilidad.

5.1. Identificación y selección de la zona de estudio

Considerando la existencia de un criterio excluyente, solo 3 de los 4 resultados enunciados fueron concluyentes. En la *Figura 5.1* se muestran las tres curvas de la influencia de cada criterio por cada uno de los atributos, los criterios con valores más altos tienen un mayor impacto, siendo estos puntos los más relevantes para el atributo evaluado, y para los más bajos, los criterios tienen menor relevancia y son menos críticos.

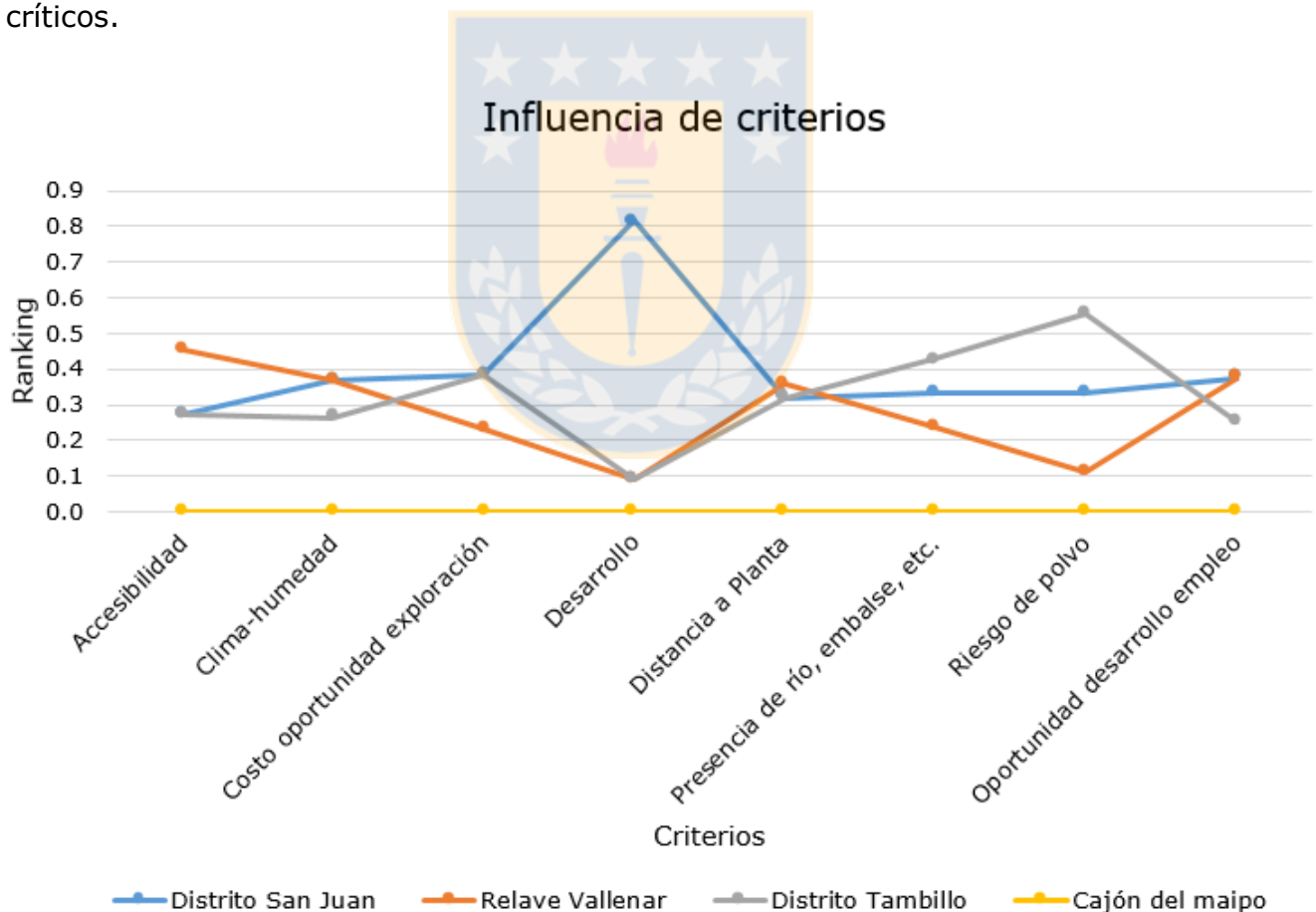


Figura 5.1: Influencia criterios.

El punto más significativo se dio para el *Distrito San Juan* con el criterio de desarrollo, con un valor de 0,82 frente a los otros dos atributos, *Relave* y *Tambillos*, que alcanzaron valores de 0,091. El criterio de riesgo de polvo obtuvo el mayor valor de 0,56 para el *Distrito Tambillos*, y menor influencia, de 0,11 y 0,33, para los otros dos atributos. Otros puntos de influencia tuvieron menor relevancia y tendieron a un comportamiento similar entre atributos, como para el clima, distancia a planta o empleabilidad. Características que dado a su semejanza entre los atributos no notaron mayor diferencia. Para determinar la mejor alternativa, mediante las ponderaciones de *rankings* de atributos y criterios se tuvo 0,41 para el caso de *A1*, 0,27 para *A2* y 0,32 para *A3* (Fig. 5.2).

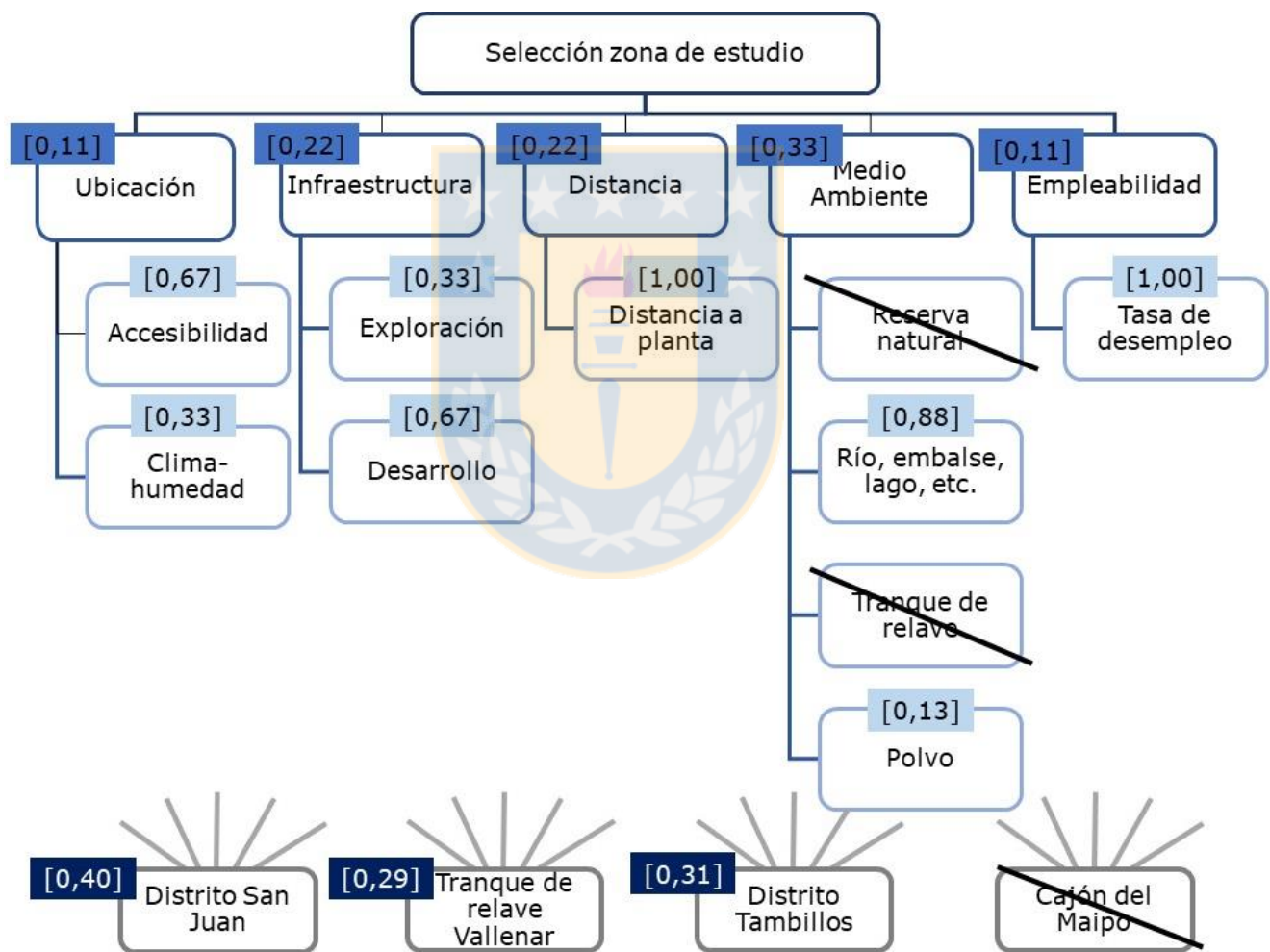


Figura 5.2: Árbol de decisión final.

Los *rankings* se ordenaron de mayor a menor, siendo el valor más alto la alternativa más conveniente. La alternativa seleccionada corresponde al *Distrito San Juan (A1)*, que está caracterizado por contar con accesibilidad regular e infraestructura considerable, al

ser un sector en un entorno minero. Por propiedades climatológicas es un ambiente seco con viento en dirección NW y velocidad 7 km/h generando presencia de polvo. Además, al requerir desarrollo de mina no es una zona difícil de explorar, en su entorno no hay zonas naturales protegidas ni ríos. Se definió la Planta Vallenar ENAMI ubicada a unos 80 km del Distrito para realizar la evaluación de procesamiento de mineral de cobre-cobalto, la cual cuenta con el tranque de relave de la operación.

Si bien el método es aplicable bajo los conceptos que se han mencionado en los *capítulos II y IV*, la selección no queda ajena a la evaluación otros métodos de MADM que se podrían estudiar desde una metodología distinta o considerando otros criterios como costos de procesamiento, equipamiento de planta, distancia a puerto, impacto ambiental por tronadura, etc. Destacar que los criterios resumidos en la *Figura 5.1* son por discusión teórica de algunos de los aspectos a la hora de llevar un proyecto minero. Al tratarse de un método en que se plasman criterios no numéricos a valores matemáticos, el ranking que define la prioridad de la alternativa depende directamente del valor que se le asigna en un inicio (*Tabla 2.1*). Como es una metodología comparativa bajo ponderaciones, siempre el criterio más influyente es el que mayor pondera y a su vez es el que tiene mayor valorización. De la *Figura 5.1* se puede interpretar el posible descarte de los criterios que generan el mayor sesgo, que corresponden a los más influyentes en sólo una o dos alternativas, como el de desarrollo y riesgo de polvo. Con lo anterior se logra hacer un análisis de los criterios que generan una influencia homogénea en todos los atributos.

5.2. Evaluación económica

El VAN de la implementación del proyecto resultó 65,41 MUSD generando un ingreso anual de 12,98 MUSD por parte del cobre y 23,40 MUSD del cobalto, considerando el incremento del 1% de los costos operacionales para el cobre y cobalto, según la *Tabla 5.1. Revisar ANEXO 4.2 para detalle evaluación.*

Tabla 5.1: Costos operacionales en MUSD.

	Cu	Co
...	-	-
2022	15.27	7.39
2023	15.42	7.46
2024	15.58	7.53
...
2030	16.49	7.98
2031	16.64	8.05

Se obtuvo una TIR aproximado de 146.5% con un VAN de -10.781 USD, representado en la *Figura 5.3. Revisar ANEXO 4.3 para detalle.*

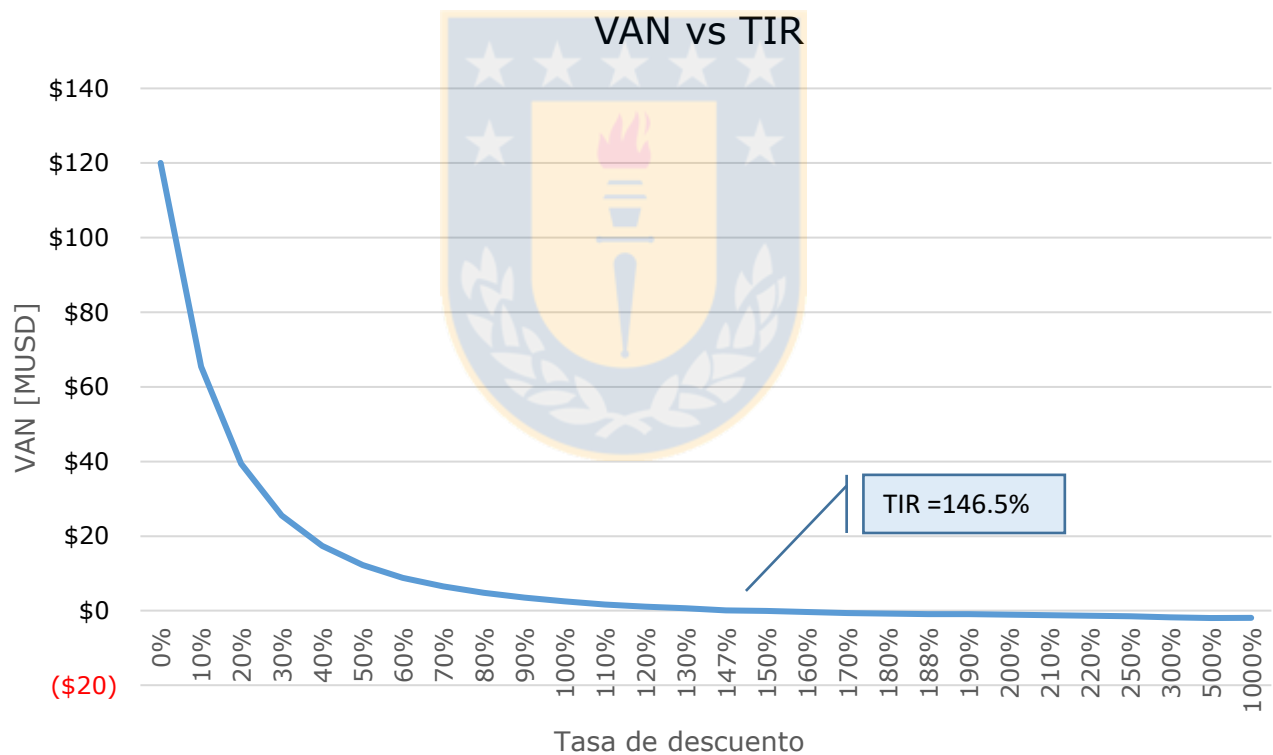


Figura 5.3: VAN vs. i.

Al tener un VAN positivo, la propuesta es factible, y la idea de generar un proyecto de recuperación de Cu-Co trae beneficios significativos. De la *Figura 5.4*, se obtuvo que el PP se da en el periodo entre el año 2021 y 2022, lo que se traduce en que el retorno de utilidades se da al poco tiempo de la puesta en marcha. Para casos supuestos en que la

inversión y la razón precio/costo varíe, el PP se ve afectado de forma en que mayor sea la primera, mayor será el PP, si aumenta la segunda, el PP disminuiría logrando obtener retornos en un menor período. *Revisar ANEXO 5.1 para detalle.*

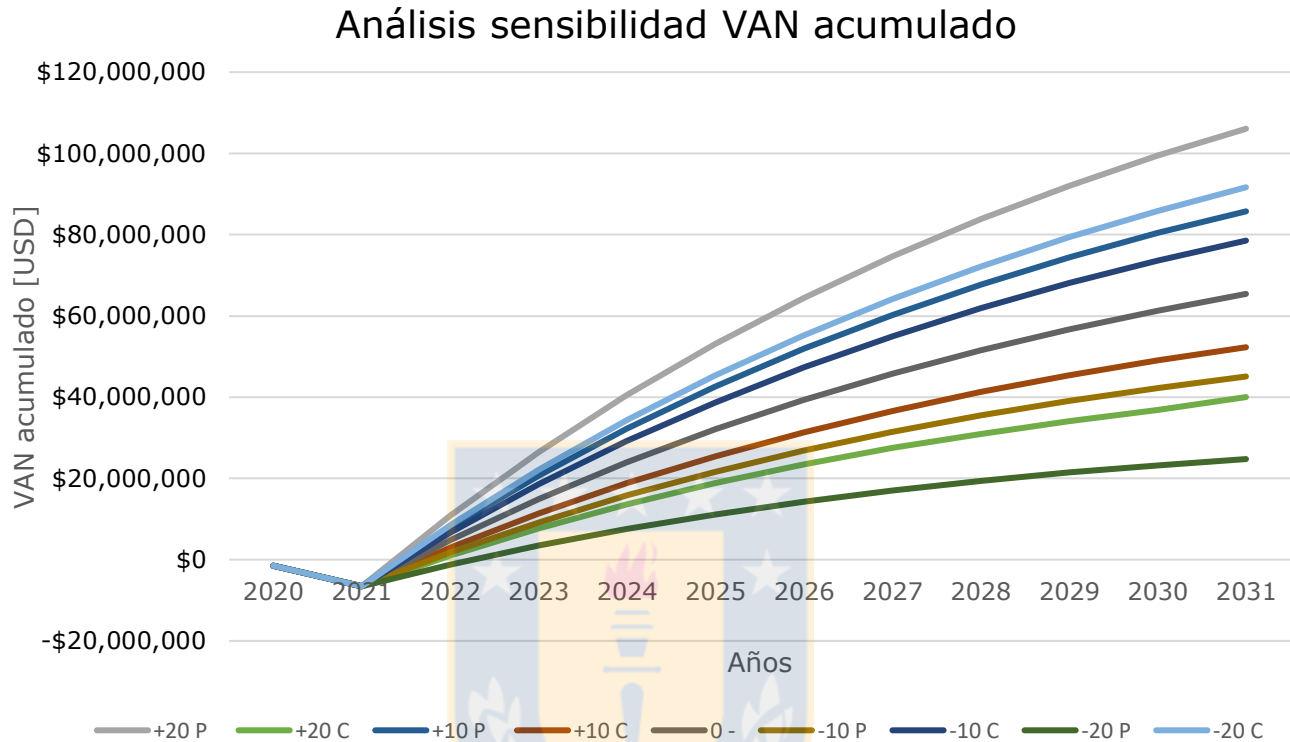


Figura 5.4: Análisis de sensibilidad 1.

El caso original, sólo producción de cobre, produjo un FC negativo debido a la falta de abastecimiento, la ley de entrada de mineral y costos operacionales, en comparación a la propuesta, de la cual se obtuvo un FC anual positivo que disminuye a una tasa constante debido al aumento de los costos operacionales. Del FC total, el cobalto aportó con la mayor parte del flujo que suple el déficit del caso original y aun así, generó el beneficio completo.

Una TIR tan alta del orden de 147%, implica que el proyecto es factible y tiene un atractivo económico importante al considerar que aún se obtienen retornos superando la tasa del 100%. También explica la robustez del proyecto al presentar incertidumbres de leyes, costos y precios.

5.3. Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se generaron dos gráficos, que identifican los rangos de variación entre los distintos escenarios que se propone. La *Figura 5.4*, corresponde a la comparación de valores económicos presentes acumulados, que muestra 9 curvas, de las cuales se obtuvieron escenarios optimistas, pesimistas y el original del caso de estudio, donde los parámetros no se ven modificados. Todas las curvas presentaron el mismo salto inicial en el primer y segundo período a causa de la inversión, donde no se muestra diferencia sino a partir del año 2022 producto de la sensibilización de los parámetros. Notar que para la *Figura 5.4* sólo se representaron los casos P_{Cu-Co} y C_{Cu-Co} , que corresponden a los escenarios donde los parámetros varían para ambos metales. Para escenarios muy pesimistas, donde los costos de tratamiento y/o pago de mineros aumente y el costo total llegue a un incremento del 20%, los retornos seguirían siendo de MUSD 51,02. Para un escenario muy bueno, cuando exista una mejor recuperación metalúrgica o el precio aumente 20% de la evaluación actual, se tendrían retornos de MUSD 80,66.

El análisis de sensibilidad de la variación de los parámetros de Precio y Costo entregó resultados favorables en los 7 casos que se evaluaron (*Tabla 5.2*).

Tabla 5.2: Análisis de sensibilidad 2.

Precio	P_{Cu}	P_{Co}	P_{Cu-Co}	C_{Cu}	C_{Co}	C_{Cu-Co}
-20%	-22,17%	-39,97%	-62,14%	27,05%	13,09%	40,14%
-10%	-11,08%	-19,99%	-31,07%	13,53%	6,54%	20,07%
0%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10%	11,08%	19,99%	31,07%	-13,02%	-6,54%	-20,07%
20%	22,17%	39,97%	62,14%	-27,05%	-12,13%	-38,83%

La *Figura 5.5*, muestra los resultados de las variaciones porcentuales de la *Tabla 5.2* donde se tuvieron números positivos que implican un impacto beneficioso en el VAN, en contraste con las variaciones negativas que lo castigan. Las curvas de C_{Co} y P_{Cu} muestran el menor impacto que tiene la modificación del parámetro de Costo para el cobalto y Precio para el cobre, antagónicamente a P_{Cu-Co} y C_{Cu-Co} , las cuales son muy sensibles y una pequeña alteración en el Precio y Costo de ambos metales produce un cambio significativo en el VAN.

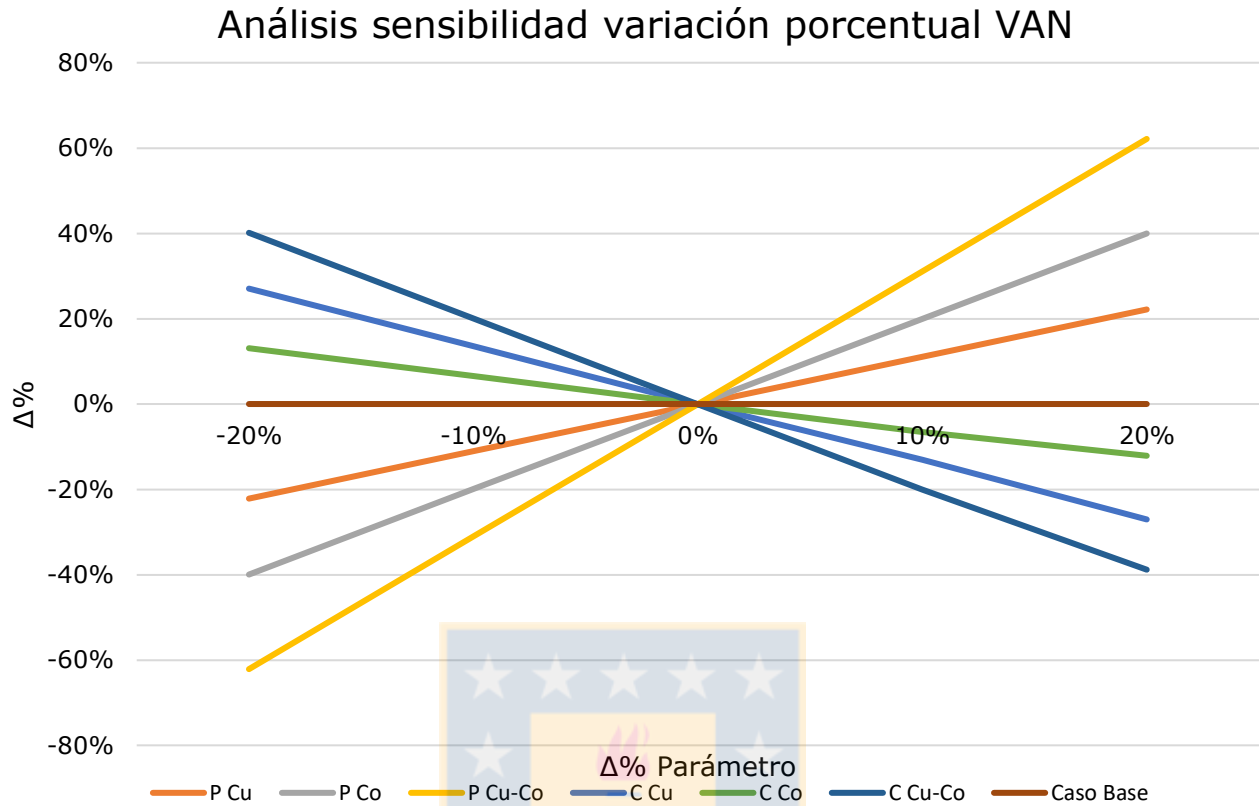


Figura 5.5: Análisis de sensibilidad 2.

Si bien en una situación real, las variaciones de parámetros no se dan únicamente en el cobre o el cobalto, la evaluación se analizó para escenarios en donde la variación del precio y el costo si se daría sólo para el cobre, sólo para el cobalto y ambos. En el caso en que el parámetro del precio se vio modificado en ambos elementos, hay un mayor delta de VAN en comparación cuando se alteró sólo uno, y en especial para el cobalto por sobre el cobre al tener un precio de unos 25 USD/lb frente a 2 USD/lb aproximadamente. Para la variación de costos, el escenario que se vio más afectado es por ambos elementos, es evidente que al modificar el costo de ambas líneas de procesamiento se incurre en más gastos e influye más en los beneficios, sobre todo para el cobre que es el mineral con más toneladas procesadas en comparación al cobalto, 21.740 y 16.800 toneladas respectivamente.

El precio de los metales varía diariamente y se ve afectada por los ciclos y por la oferta-demanda, que para el caso del cobalto y cobre tienen una proyección positiva en el corto y mediano plazo. El costo se ve afectado por todas las complejidades de la operación,

aumento del consumo de insumos, precio de la energía, combustible, agua, etc., mantención y renovación de equipos, entre otros. Para un caso contrario, la disminución de costos se refleja en una mayor eficiencia de los procesos y cuando se instalan tecnologías que lo permiten.



CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras la evaluación de las distintas localidades donde existen recursos de cobalto en Chile, mediante la teoría de MADM específicamente la metodología AHP, se obtuvieron resultados con interpretaciones positivas y cálculos exitosos según el CR. Si bien el AHP presenta limitaciones por transformar un problema genérico a uno numérico, al intervenir interpretaciones de las características cualitativas y de distintas unidades de medidas a valorizaciones, entrega una respuesta confiable al planteamiento del problema.

El método matricial arrojó como alternativa eficiente con el mayor *ranking* de 0,41 y un CR de 0, lo implica que la excelente precisión de los cálculos al tratarse de matrices de acotados órdenes, el sector del Distrito San Juan en la comuna de Freirina, III región de Atacama, ubicado a 80 km de la planta de beneficio ENAMI Vallenar.

La evaluación económica aplicada al caso de estudio bajo la definición de la planta Vallenar, entregó conclusiones positivas en cuanto al VAN, incluso bajo escenarios pesimistas expuestos en un análisis de sensibilidad de los parámetros de costos y precio. El valor presente neto calculado de la propuesta de proyecto es de 65,41 MUSD que, en detalle, es la representación de los flujos caja anuales de lo que entrega el cobre y el cobalto. Si bien el cobre corre como castigo al aportar con un FC anual negativo, el cobalto minora completamente el impacto al generar un flujo muy favorable. Se concluyó que para todos los supuestos escenarios se obtuvieron buenos resultados, tanto para los optimistas con variación favorable de los parámetros, como para el caso más adverso en que el precio del cobre y cobalto disminuye en 20% resultando un VAN de 24,77 MUSD. Esto demuestra que podría ser interesante evaluar la posibilidad de reactivar operaciones de extracción de mineral de cobalto, y por sobre todo, darle un valor comercial, pudiendo lograr procesar 180.000 toneladas anuales de mineral. Lo expuesto lleva a la oportunidad para que Chile tenga una participación internacional importante de cobalto como la del cobre o litio, más aun por las complicaciones de la oferta en cuanto a problemas sociales de las principales fuentes, que si bien no incluye la gran minería del RDC, si lo hace la artesanal.

Es necesario recalcar el papel que cumple ENAMI para el apoyo a la minería artesanal, pequeña y mediana no solo como soporte económico, sino también aspectos técnicos y

operacionales, lidiando con problemas de fomento y producción. A su vez, rescatar la importancia de la diversificación de la matriz productiva minera incluyendo nuevos elementos, y acercarnos al mercado de metales claves para el desarrollo tecnológico, dirigiendo la actividad minera en la línea de la sustentabilidad.

Por último, es necesario dejar una reflexión en cuanto al permanente impacto irreversible que produce la minería. Los problemas ambientales que genera la extracción de recursos naturales están y estarán presente indudablemente; el agua, el suelo, la flora y fauna que forman el ecosistema siempre se verán perjudicado con una intervención artificial extractiva y más aún con la instalación de mega proyectos. Si bien el progreso ha llevado a la necesidad de la explotación de minerales sin tener otra alternativa, el deber de la ingeniería y el avance científico es de ayudar a remediar los problemas ya ocasionados y seguir buscando formas para desarrollar una actividad de la manera más limpia posible, por muy inevitable que sea la huella que se deja en la tierra.

Recomendaciones

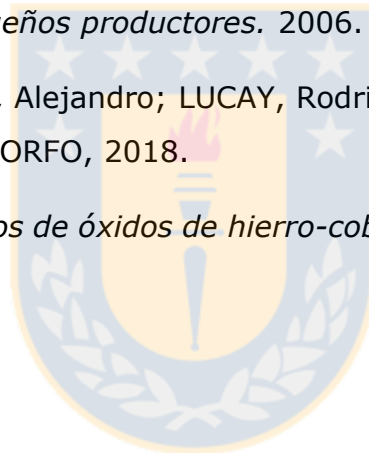
- Iniciar procesos de exploración en los yacimientos mencionados y generar campañas de sondeos para continuar con las siguientes etapas de un proyecto minero.
- No descartar la evaluación de otros yacimientos y fuentes de recursos en las que se pueda recuperar cobalto. No limitarse únicamente a los sectores mencionados y mineralogía sulfurada, pudiendo existir otras oportunidades con interés económico en minerales oxidados.
- Abordar el levantamiento de información de tecnologías de procesos extractivos iniciando estudios de técnicas convencionales y nuevas patentes que hay en el mercado.
- El caso en que ENAMI entre en la producción de cobalto, mencionar la necesidad de implementar una tarifa para compra de mineral seco a los proveedores.
- Para futuras evaluaciones, considerar ley de corte y ley equivalente para yacimientos polimetálicos en planificación minera.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. AGACINO, Rafael. *Medio Ambiente, Informe Anual 2017*. Instituto Nacional de Estadística, 2016.
- [2]. BANCO CENTRAL DE CHILE. *Base de datos estadística móvil, desempleo*. Información disponible en https://si3.bcentral.cl/Bdemovil/BDE/Series/MOV_SC_ML3. 2018.
- [3]. BROWN, T. J.; IDOINE, N. E.; RAYCRAFT, E. R.; SHAW, R. A.; HOBBS, S. F.; EVERETT, P.; DEADY, E. A.; BIDE, T. *World Mineral Production 2012-16*. British Geological Survey, 2018.
- [4]. CLOVES, William; WILSON, Thomas. *Never mind the mines. In Congo, there is Cobalt under the house*. Información disponible en sitio web <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-03-28/never-mind-the-mines-in-congo-there-s-cobalt-under-the-house>. Bloomberg, 2018.
- [5]. COBALT INSTITUTE. *2017 Production Statistics*. Información disponible en sitio web <https://www.cobaltinstitute.org/statistics.html>. 2017.
- [6]. COMITÉ DE RECURSOS MINEROS. *Código para la certificación de prospectos de exploración, recursos y reservas*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2003.
- [7]. CONSEJO MINERO. *Cifras actualizadas de la minería*. 2018.
- [8]. CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. *Parques Nacionales*. Información disponible en <http://www.conaf.cl/parques-nacionales/>. 2018.
- [9]. D'AUBAREDE, Guillermo. *Evaluación de los conocimientos existentes sobre cobalto manganeso Mercurio*. Instituto de Investigacion de Recursos Naturales, Corporación de Fomento de la Producción, 1969.
- [10]. DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS. *Síntesis Económica Región de Atacama*. Corporación para el Desarrollo de la Región de Atacama, 2016.
- [11]. DONOSO, Francisco; CASTILLO, Emilio; CANTALLOPTS, Jorge. *Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana y pequeña minería chilena*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Comisión Chilena del cobre, 2016.

- [12]. FERRANDO, Alonso P. *Commodities. Análisis sobre la volatilidad de sus precios*. Instituto Estrategia Internacional, 2011.
- [13]. FINANCIAL TIMES. *Scheme to track first 'ethical cobalt' from Congo*. Información disponible en <http://www.ft.com>. 2018.
- [14]. FISHER, K. G. *Cobalt processing developments. En 6th Southern African Base Metals Conference*, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011.
- [15]. FRUTOS, José; OYARZÚN, Roberto; PINCHEIRA, Marcos (ed.). *Geología y recursos minerales de Chile*. Editorial de la Universidad de Concepción, 1986.
- [16]. GLOBAL ENERGY METALS. *Cobalt Demand*. Información disponible en <https://www.globalenergymetals.com/cobalt/cobalt-demand/>. 2018.
- [17]. GUNN, Gus (ed.). *Critical metals handbook*. John Wiley & Sons, 2014.
- [18] HANNIS, Sarah; BIDE, Tom. *Cobalt*. British Geological Survey, 2009.
- [19]. HILSON, Gavin M. (ed.). *The socio-economic impacts of artisanal and small-scale mining in developing countries*. CRC Press, 2006.
- [20]. KISANGANI, Emizet Francois. *Historical dictionary of the Democratic Republic of the Congo*. Rowman & Littlefield, 2016.
- [21]. LONDON METAL EXCHANGE. *LME Cobalt*. Información disponible en <https://www.lme.com/en-GB/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=7>. 2018.
- [22]. METE, Marcos Roberto. *Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 2014, vol. 7, no 7, p. 67-85.
- [23]. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US). COMMITTEE ON COMMINUTION; ENERGY CONSUMPTION; NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (US). *Comminution and Energy Consumption*. National Academies, 1981.
- [24]. OBER, Joyce A. *Mineral commodity summaries 2018*. US Geological Survey, 2018.
- [25]. RED AGROMETEOROLÓGICA. *Estaciones*. Información disponible en sitio web <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>. 2018.

- [26]. SAATY, Roseanna W. *The analytic hierarchy process—what it is and how it is used*. Mathematical modelling, 1987, vol. 9, no 3-5, p. 161-176.
- [27]. SERNAGEOMIN. *Anuario de la minería de Chile 2016*. 2016.
- [28]. SERNAGEOMIN. *Atlas de Depósitos de Relaves de Chile*. Información disponible en <http://relaves.sernageomin.cl/#/home>. 2015.
- [29]. SHEDD, Kim B. *2015 Minerals Yearbook*. U.S. Department of Interior, U. S. Geological Survey, 2015.
- [30]. SHEDD, K.; MCCULLOUGH, E.; BLEIWAS, D. *Global trends affecting the supply security of cobalt*. *Mining Engineering*, 2017, vol. 69, no 12, p. 37-42.
- [31]. SONAMI. *Guía de conversión de unidades en la minería del cobre, precios, costos y cargos orientada a los pequeños productores*. 2006.
- [32]. TOWNLEY, Brian; DÍAZ, Alejandro; LUCAY, Rodrigo. *Estado del arte y potenciales recursos CO y MN en Chile*. CORFO, 2018.
- [33]. VIVALLO, W. *Yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro en Chile*. En *XII Congreso Geológico Chileno*, 2009.



ANEXOS



Figura 1: Proceso de compra de minerales y productos mineros. (Fuente: ENAMI).

ANEXO 1.1: Tarifario de compra de mineral

TARIFAS DE COMPRA - VALORES EN \$		ENTREGAS CORRESPONDIENTES AL MES DE				julio de 2018			
Tarifas Definitivas de Cobre, Plata y Oro									
CUPRIFEROS					AURIFEROS		ARGENTIFEROS		
TARIFA		cobranza		otorgamiento	cobranza		TARIFA		TARIFA
base	escala	Fondo Estabilización		crédito tar indiv	base	escala	base	escala	
\$/tms	\$/tms.1%	\$/tms.1%	\$/tms.1%	\$/tms.1%	\$/tms	\$/tms.1 g/t	\$/tms	\$/tms.1 g/t	
MINERALES DE FLOTACION:									
COBRE: BASE 2,5% CU INSOLUBLE - ORO: BASE 5 GR/T - PLATA: BASE 350 GR/T									
TARIFAS DEFINITIVAS DEL MES									
tarifas nacionales excepto indicadas	66.158	35.592	2.404	0	1.250	60.642	16.728	44.624	193
tarifa cobre agencia Matta	68.679	35.592	2.404	0	1.250				
tarifa ganga caliza Cabildo - Rancagua	55.420	31.296	2.114	0	1.099				
tarifa equivalente	45.639	27.384	2.404	0	1.250				
MINERALES DE LIXIVIACION EN PILAS:									
COBRE: BASE 2,5% CU SOLUBLE									
TARIFAS DEFINITIVAS DEL MES									
tarifas nacionales óxidos (sxew)	55.502	29.126	2.143	0	1.114				
ajuste por ácido tarifa nacional óxidos : \$(1% Cu - 1 kg ácido/kg Cu recuperado)					sobre un consumo base de 4,98 kg/kg : 334				
tarifas sxew plantas ENAMI + Cabildo	57.369	29.873	2.198	0	1.143				
ajuste por ácido tarifa sxew plantas enami + cabildo : \$(1% Cu - 1 kg ácido/kg Cu recuperado)					sobre un consumo base de 4,98 kg/kg : 342				
tar experimental baja ley T1*	54.260	28.629	2.198	0	1.143				
tar experimental baja ley T2*	51.795	27.643	2.198	0	1.143				
tar experimental baja ley T3*	49.331	26.658	2.198	0	1.143				
tar experimental baja ley T4*	46.876	25.676	2.198	0	1.143				

Figura 2: Tarifas ENAMI compra de mineral Julio-2018. (Fuente: ENAMI, 2018).

ANEXO 2.1: Propiedades físicas y químicas del cobalto

Tabla 1: Propiedades Co [18].

Número atómico	27
Peso atómico	58,93
Densidad a 20° C	8.850 kg/m ³
Punto de fusión	1.493 °C
Punto de ebullición	3.100 °C
Cristalización	Hexagonal compacta
Dureza (Escala de Mohr)	5,00 – 5,50
Conductividad eléctrica	27,6% ¹

¹ Estándar Internacional de cobre Recocido, International Annealed Copper Standard.

ANEXO 2.2: Principales minerales de cobalto

Tabla 2: Minerales de cobalto

Mineral	Tipo	Fórmula química	Contenido cobalto[%]
Eritrina	Óxido	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	29,50
Skutterudita	Arseniuro	CoAs_3	28
Cobaltita	Sulfo-arseniuro	AsCoS	35,40
Carrolita	Sulfuro	CuS_4	-
Linneíta	Sulfuro	Co_3S_4	31– 40
Asbolana	Óxido	$\text{CoO} \cdot 2\text{Mn} \cdot \text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-
Safflorita	Arseniuro	$\text{Co}(\text{Fe}) \text{As}_2$	18
Danita	Sulfo-arseniuro	SAsFeCo	12

Tabla 3: Otros minerales

Mineral	Tipo	Fórmula química	Carácter mineralógico
Antlerita	Sulfato	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	Mena
Azurita	Carbonato	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Mena
Calcita	Carbonato	CaCO_3	Ganga
Calcopirita	Sulfuro	CuFeS_2	Mena
Crisocola	Óxido	$\text{Cu}_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Mena
Cuarzo	Silicato	SiO_2	Ganga
Pirita	Sulfuro	FeS_2	Mena
Malaquita	Carbonato	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Mena
Pirrotina	Sulfuro	Fe_aS_b	Ganga
Turmalina	Silicato	...	Ganga



ANEXO 2.3: Producción histórica de cobalto

Tabla 4: Producción histórica de Co en Chile [9].

Año	Producción [kg fino]
1844-1902	5.941.384 ¹
1903	20.376 ¹
1904	7.500
1905	1.954
1906	7.500
1907-1923	-
1924	2.075
1925	-
1926	960
1927	471
1928	1.667
1929-1937	-
1938	724
1939	3.110
1940	-
1941	2.487
1942	130
1943	2.890
1944	5.070
1945	1.404

¹ Sin información sobre ley de mineral.

ANEXO 2.4: Geología distrito San Juan

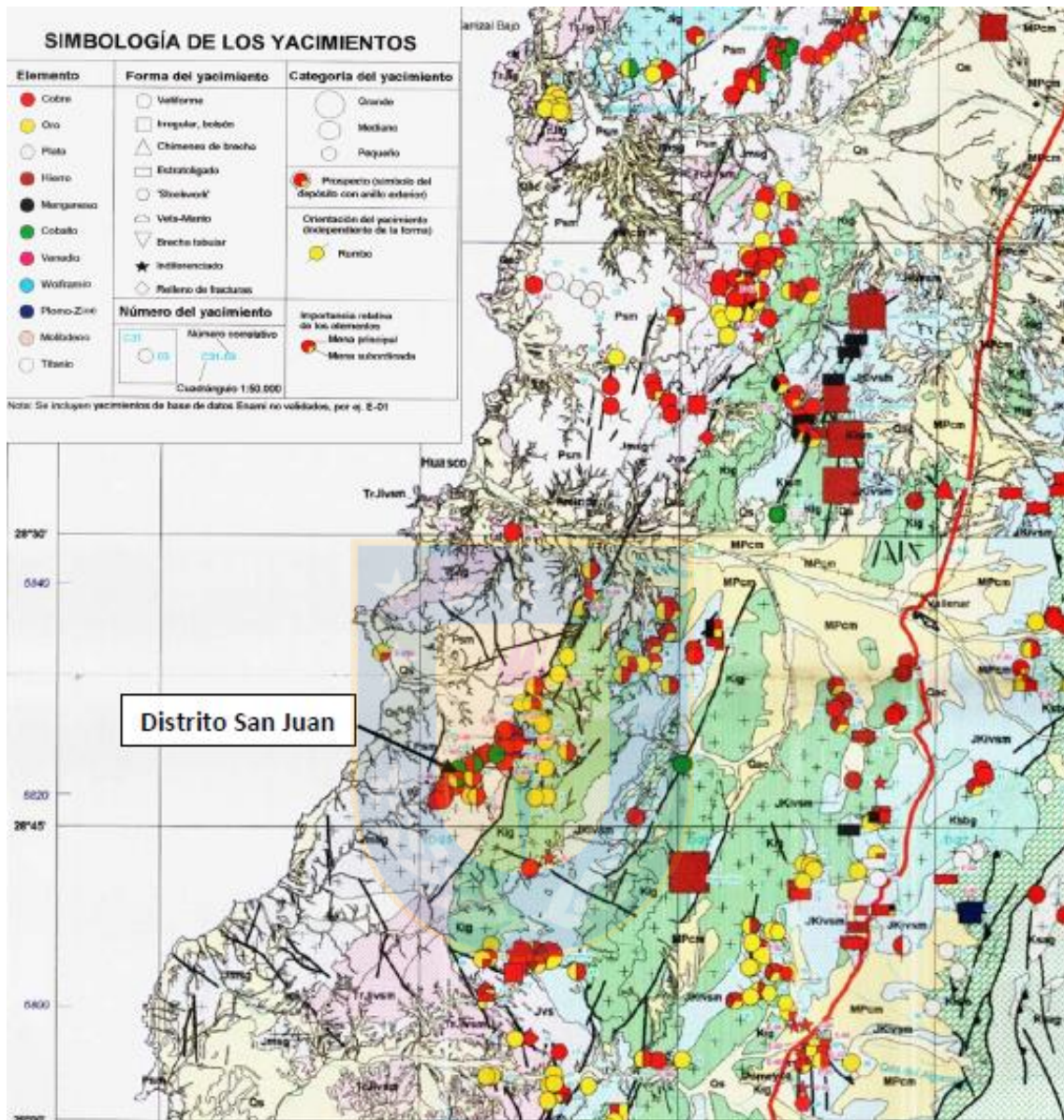


Figura 3: Contexto geológico distrito San Juan [32].

ANEXO 2.5: Línea de tiempo geológica

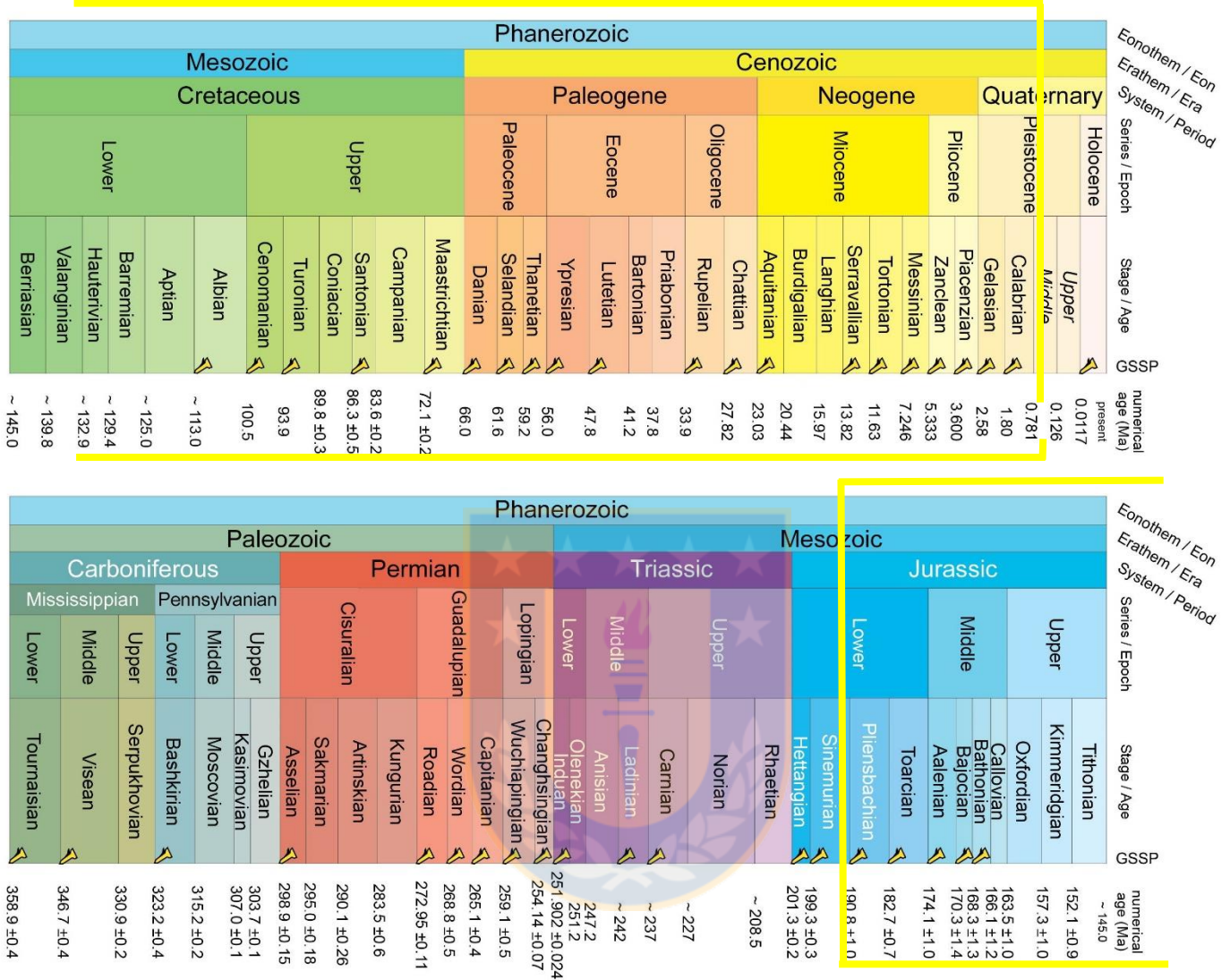
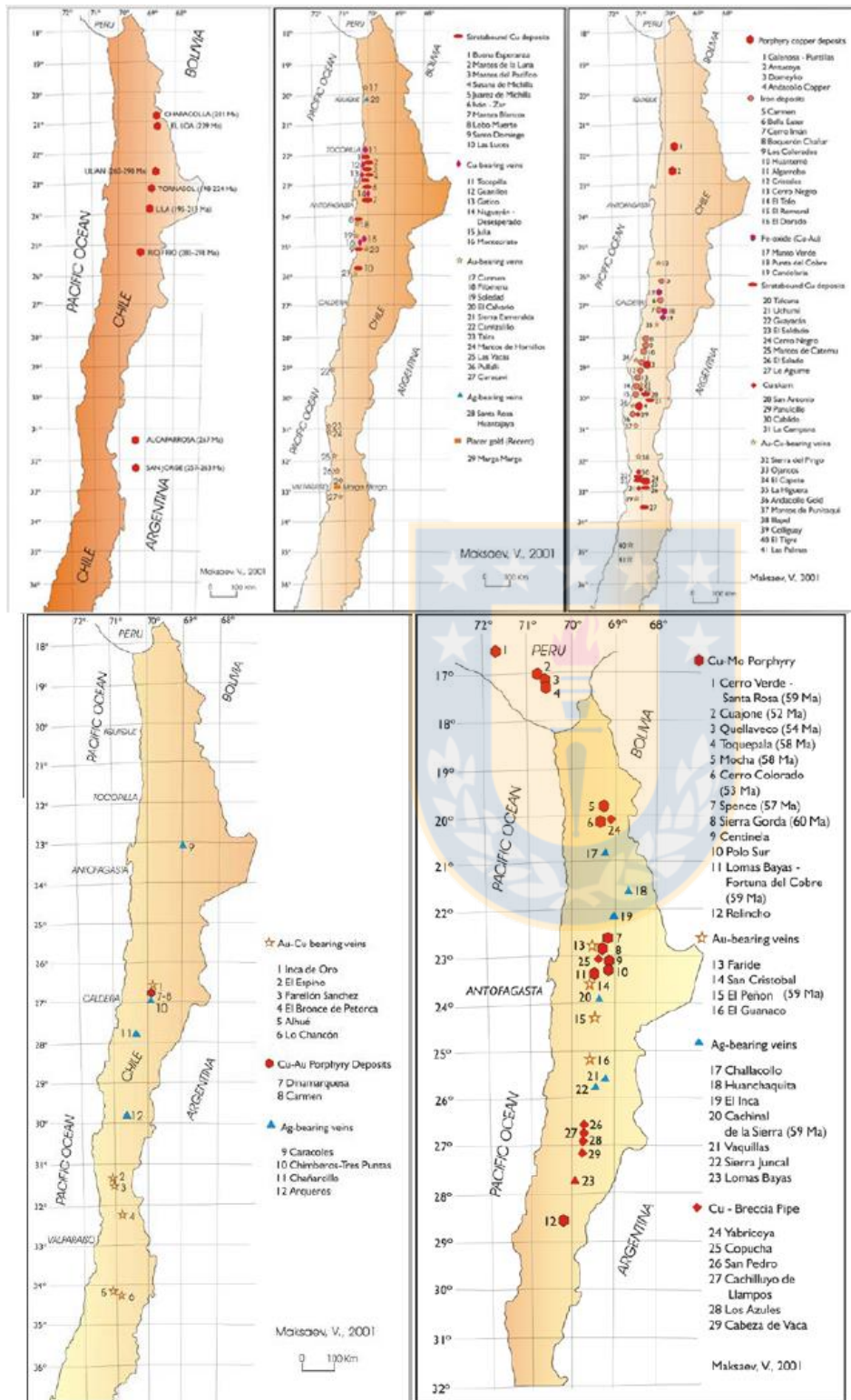


Figura 4: Gráfico crono estratigráfico internacional. (Fuente: Comisión de Estratigrafía Internacional, *International Commission on Stratigraphy*, 2017).

ANEXO 2.6: Contexto geológico



Yacimientos tipo pórfido cuprífero del Paleozoico - Triásico (sup. izda.).

Yacimientos tipo estrato ligados de cobre y vetas de oro y plata del Jurásico (sup. centro).

Yacimientos tipo pórfido cuprífero, hierro apatito (IOA), óxidos de hierro-cobre oro (IOCG), estrato ligados de cobre, skarn de cobre y vetas de cobre-oro del Cretácico Inferior (sup. dcha.).

Franjas metalogénicas del Cretácico Superior (inf. Izda.) y del Paleoceno - Eoceno Inferior (inf. dcha.).

Figura 5: Mapa metalogénesis Chile [32].

ANEXO 2.7: Reservas mundiales

Tabla 5: Reservas mundiales [24].

País	Reservas [t]
Estados Unidos	23.000
Australia	1.200.000
Canadá	250.000
República Democrática del Congo	3.500.000
Cuba	500.000
Madagascar	150.000
Papúa Nueva Guinea	51.000
Filipinas	280.000
Rusia	250.000
Sudáfrica	29.000
Zambia	270.000
Otros países	560.000
Total mundial	7.100.000

ANEXO 2.8: Producción primario cobalto

Tabla 6: Producción mina de cobalto por países [24].

País	2016	2017
	[t]	[t]
Estados Unidos	690	650
Australia	5.500	5.000
Canadá	4.250	4.300
Congo (Kinshasa)	64.000	64.000
Cuba	4.200	4.200
Madagascar	3.800	3.800
Nueva Caledonia	3.390	2.800
Papua Nueva Guinea	2.190	3.200
Filipinas	4.100	4.000
Rusia	5.500	5.600
Sudáfrica	2.300	2.500
Zambia	3.000	2.900
Otros	7.600	5.900
Total	111.000	110.000

Tabla 7: Producción mundial de cobalto refinado [29].

País	Toneladas
Bélgica	6.329
Finlandia	12.393
Francia	119
Noruega	3.451
Rusia	2.100
RDC	400
Madagascar	3.273
Marruecos	2.081
Sudáfrica	1.101
Zambia	4.725
Canadá	6.355
Brasil	400
China	45.046
India	100
Japón	4.305
Australia	3.200
Nueva Caledonia	2.531
Total	97.999

ANEXO 3.1: Operaciones en de pequeña escala en Chile.

Tabla 8: Sectores de minería de pequeña escala [19].

Región	Actividad minera	Provincia	Municipios
II Antofagasta	cobre oro	Tocopilla	Tocopilla
		Antofagasta	Antofagasta
		El Loa	Taltal
III Atacama	cobre oro	Chañaral	Chañaral
		Copiapó	Diego de Almagro Copiapó
		Huasco	Tierra Amarilla Huaco
			Freirina
			Vallenar
IV Coquimbo	cobre oro	Elqui	Andacollo
		Limarí	Ovalle
		Choapa	Combarbalá
			Illapel
V Valparaíso	cobre oro	Valparaíso	Quilpué
			Casablanca
VIII Bío-Bío	Carbón	Concepción	Coronel
		Arauco	Lota
			Curanilahue
			Lebu
			Los Álamos

Tabla 9: Número de plantas y operaciones de pequeña escala [19].

Región	Plantas	Operaciones mineras	Total
I Tarapacá	3	27	30
II Antofagasta	11	191	202
III Atacama	99	641	740
IV Coquimbo	139	588	727
V Valparaíso	20	95	115
VI Rancagua	1	55	56
RM	8	29	37
Total	281	1.626	1.907

Tabla 12: Matrices pareada sub-criterios.

C1	C1.1	C1.2
C1.1	1	2
C1.2	0,5	1
Suma	1,5	3

C2	C2.1	C2.2
C2.1	1	0,5
C2.2	2	1
Suma	3	1,5

Tabla 13: Normalización y ranking sub-criterios.

C1	C1.1	C1.2	Ranking
C1.1	0,67	0,67	0,67
C1.2	0,33	0,33	0,33

C2	C2.1	C2.2	Ranking
C2.1	0,33	0,33	0,33
C2.2	0,67	0,67	0,67

C3	1
C4	C4.1 C4.2 C4.3 C4.4
C4.1	± 1,29 1,80 9
C4.2	0,78 1 1,40 7
C4.3	0,56 0,71 ± 5
C4.4	0,11 0,14 0,20 ±
Suma	- 1,43 - 8

C3	1
-----------	----------

C4	C4.1	C4.2	Ranking
C4.1	0,88	0,88	0,88
C4.2	0,13	0,13	0,13

C5	1
-----------	----------

C5	1
-----------	----------

Tabla 14: Ponderación importancia criterios.

C1.1	C1.2	C2.1	C2.2	C3	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4	C5
0,07	0,04	0,07	0,15	0,22	-	0,29	-	0,04	0,11

Tabla 15: Matriz pareada atributos.

C1.1	A1	A2	A3	A4
A1	1	0,60	1	3
A2	1,67	1	1,67	5
A3	1	0,60	1	3
A4	0,33	0,20	0,33	1
Suma	3,67	2,20	3,67	-

C1.2	A1	A2	A3	A4
A1	1	1	1,40	2,33
A2	1	1	1,40	2,33
A3	0,71	0,71	1	1,67
A4	0,43	0,43	0,60	1
Suma	2,71	2,71	3,80	-

C2.1	A1	A2	A3	A4
A1	1	0,71	1	5
A2	1,40	1	1,40	7
A3	1	0,71	1	5
A4	0,20	0,14	0,20	1
Suma	3,40	2,43	3,40	-

C2.2	A1	A2	A3	A4
A1	1	9	9	9
A2	0,11	1	1	1
A3	0,11	1	1	1
A4	0,11	1	1	1
Suma	1,22	11	11	-

Tabla 16: Normalización y ranking atributos.

C1.1	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,27	0,27	0,27	0,27
A2	0,46	0,46	0,46	0,46
A3	0,27	0,27	0,27	0,27

C1.2	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,37	0,37	0,37	0,37
A2	0,37	0,37	0,37	0,37
A3	0,26	0,26	0,26	0,26

C2.1	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,29	0,29	0,29	0,29
A2	0,41	0,41	0,41	0,41
A3	0,29	0,29	0,29	0,29

C2.2	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,82	0,82	0,82	0,82
A2	0,09	0,09	0,09	0,09
A3	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabla 17: Matriz pareada atributos.

C3.1	A1	A2	A3	A4
A1	1	0,89	1	8
A2	1,13	1	1,13	9
A3	1	0,89	1	8
A4	0,13	0,11	0,13	1
Suma	3,13	2,78	3,13	-

C4.2	A1	A2	A3	A4
A1	1	1,40	0,78	0,78
A2	0,71	1	0,56	0,56
A3	1,29	1,80	1	1
A4	1,29	1,80	1	1
Suma	3	4,20	2,33	-

C4.4	A1	A2	A3	A4
A1	1	3	0,60	0,33
A2	0,33	1	0,20	0,11
A3	1,67	5	1	0,56
A4	3	9	1,80	1
Suma	3	9	1,80	-

C5.1	A1	A2	A3	A4
A1	1	1	1,50	9
A2	1	1	1,50	9
A3	0,67	0,67	1	6
A4	0,11	0,11	0,17	1
SUMA	2,67	2,67	4	-

Tabla 18: Normalización y ranking atributos.

C3.1	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,32	0,32	0,32	0,32
A2	0,36	0,36	0,36	0,36
A3	0,32	0,32	0,32	0,32

C4.2	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,33	0,33	0,33	0,33
A2	0,24	0,24	0,24	0,24
A3	0,43	0,43	0,43	0,43

C4.4	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,33	0,33	0,33	0,33
A2	0,11	0,11	0,11	0,11
A3	0,56	0,56	0,56	0,56

C5.1	A1	A2	A3	Ranking
A1	0,38	0,38	0,38	0,38
A2	0,38	0,38	0,38	0,38
A3	0,25	0,25	0,25	0,25

Tabla 19: Ranking atributos según criterio.

	C1.1	C1.2	C2.1	C2.2	C3.1	C4.2	C4.4	C5.1
A1	0,27	0,37	0,29	0,82	0,32	0,33	0,33	0,38
A2	0,46	0,37	0,41	0,09	0,36	0,24	0,11	0,38
A3	0,27	0,26	0,29	0,09	0,32	0,43	0,56	0,25
A4	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 20: Ranking final.

Atributo	Ranking
A1	0,40
A2	0,29
A3	0,31
A4	-



ANEXO 4.2: Evaluación económica

Tabla 21: Análisis económico.

Sin proyecto		2020	2021	2022	2023	2024	2024	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Ingreso Cu	MUSD /año	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96
Ingreso Co	""	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo Cu	""	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51	3,51
Costo Co	""	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FC	MUSD	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53
Con proyecto													
Ingreso Cu	MUSD /año	2,99	2,99	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98	12,98
Ingreso Co	""	-	-	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40	23,40
Costo Cu	""	3,15	3,15	15,27	15,42	15,58	15,73	15,88	16,03	16,19	16,34	16,49	16,64
Costo Co	""	-	-	7,39	7,46	7,53	7,61	7,68	7,76	7,83	7,90	7,98	8,05
I	MUSD	-1	-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FC	MUSD /año	-1,53	-5,53	13,73	13,50	13,27	12,05	12,82	12,59	12,37	12,14	11,92	11,69

ANEXO 4.3: TIR

Tabla 22: Evaluación TIR

TIR	VAN
0%	120.02
10%	65.41
20%	39.39
30%	25.49
40%	17.35
50%	12.23
60%	8.82
70%	6.44
80%	4.72
90%	3.43
100%	2.45
110%	1.69
120%	1.09
130%	0.60
146.5%	-0.01
150%	-0.12
160%	-0.39
170%	-0.61
180%	-0.80
188%	-0.92
190%	-0.96
200%	-1.10
210%	-1.22
220%	-1.32
250%	-1.55
300%	-1.77
500%	-1.99
1000%	-1.90

ANEXO 5.1: VAN acumulado

Tabla 23: VAN acumulado.

Caso base	2020		2021		2022		2023		2024		2025		2026		2027		2028		2029		2030		2031	
	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año	FC	MUSD/ año
		-1,53		-5,53		13,73		13,50		13,27		13,05		12,82		12,59		12,37		12,14		11,92		11,69
		-1,53		-6,55		4,79		14,94		24,00		32,10		39,34		45,80		51,57		56,72		61,32		65,41

Tabla 24: Sensibilidad VAN acumulado.

Escenario	VAN acumulado	
Precio	+20%	106,06
	+10%	85,74
	-10%	45,09
	-20%	24,77
Costo	+20%	80,66
	+10%	72,61
	-10%	58,22
	-20%	51,09

Tabla resumen del VAN acumulado de los escenarios donde la variación de precio y costo se da tanto en el caso del cobre como del cobalto.

