

2017

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE MINERALES ESTRATÉGICOS A PARTIR DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

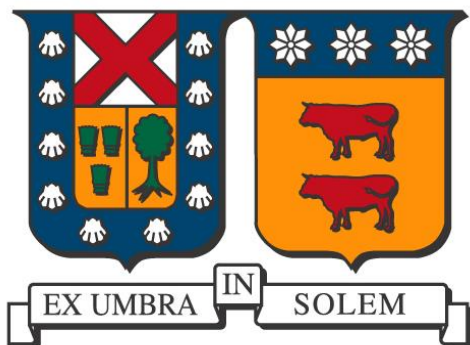
CHÁVEZ MATUS, TABATHA MONTSERRAT ALEXANDRA

<http://hdl.handle.net/11673/23175>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



“ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE MINERALES ESTRATÉGICOS A PARTIR DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS”

MEMORIA PARA AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

TÁBATHA CHÁVEZ MATUS

PROFESOR GUÍA:
CLAUDIO ACUÑA

PROFESOR CO-GUÍA:
MARCO VERA

VALPARAISO
2017

RESUMEN

Actualmente se está viviendo una situación geopolítica compleja por la escasez y monopolio de un grupo de minerales denominados minerales estratégico, dicha clasificación ha sido asignada por la Unión Europea, como alerta a la comunidad mundial para intensificar la investigación y el desarrollo de la extracción de estos por diferentes medios. Estos minerales, tales como el Berilio, Germanio, Indio, Galio, Tierras Raras, Niobio, entre otros poseen una demanda ascendente por su utilización en el desarrollo de tecnologías médicas, energías renovables, aparatos electrónicos, defensa militar y diversas otras aplicaciones que sustentan al mundo actual. Dada la demanda ascendente y monopolio en la producción, existe un inminente riesgo de suministro, representando un peligro para la economía mundial.

Por otra parte, en Chile existen 15 mil millones de toneladas de relaves, en los que se han encontrado cantidades importantes de metales (6000 ppm de cobre, 3% de fierro), o cantidades relevantes económicamente de minerales estratégicos (20 ppm de Neodimio, 30 ppm de Galio, 20 ppm de Germanio, entre otros). Dicho escenario hace la diversificación de la matriz de extracción de minerales una oportunidad de mercado atractivo para el país.

En este contexto, se presenta el desarrollo de un diseño de proceso aplicado a un caso de estudio del potencial económico de extracción y comercialización de minerales estratégicos. El caso de estudio parte con la caracterización de los elementos químicos, mediante un análisis ICP-MS del tranque Coemin con 30 millones de toneladas de relave. Se desarrolla una metodología para priorizar los elementos a recuperar, a través de una matriz de selección; considerando precios, demanda, riesgo de suministro, eficiencia de la tecnología, costo de la tecnología, y ganancias por toneladas material. Bajo esta metodología, se seleccionan: Galio, Germanio, Cobalto y Cobre, luego de esto se realiza un diseño de procesos. El diseño considera un proceso hidrometalúrgico con una etapa de flotación colectiva y reactor autoclave y una separación de cada elemento de valor, mediante extracción por solvente, para luego mediante métodos de purificación, se extrae Cobre, Galio y Cobalto metálico, junto con óxido de Germanio. Se analizó la factibilidad del proyecto realizando un estudio económico del caso, demostrándose que el proyecto tiene un valor actual neto de 122 millones de dólares y una tasa interna de retorno de 22%, además este proyecto busca enmarcarse en una empresa clase B.

Con esta propuesta se plantea un nuevo modelo de negocios para el país, que a su vez ayudará con una de las mayores crisis ambientales de este, los relaves mineros. Los pasivos ambientales mineros son prioridad nacional en diversos ámbitos, tales como el medioambiental, legislativo, tecnológico, entre otros. Al mismo, el trabajo de memoria busca tener un impacto económico diversificando la matriz de productos, así como un mercado con una demanda sostenida y con pocos proveedores.

ABSTRACT

Currently, a complex geopolitical situation is being experienced due to the scarcity and monopoly of a group of minerals called ***Critical Raw Materials***. This classification has been assigned by the European Union, as a warning to the world community to intensify the research and development of the extraction of minerals. These elements, such as Beryllium, Germanium, Indium, Gallium, Rare Earth, Niobium, among others, have an ascending demand for their use in the development of medical technologies, renewable energies, electronic devices, military defence and other applications that sustain the actual society. Given the upward demand and monopoly in production, there is an imminent risk of supply, representing a danger to the world economy.

On the other hand, in Chile there are 15 billion tons of tailings, in which significant quantities of metals have been found (6000 ppm of copper, 3% of iron), or economically relevant quantities of strategic minerals (20 ppm of Neodymium, 30 ppm of Gallium, 20 ppm of Germanium, among others). This scenario makes the diversification of the mineral extraction matrix an attractive market opportunity for the country.

In this context, this thesis is about the development of a process design applied to a case study of the economic potential of extraction and commercialization of Critical Raw Materials. The case study begins with the characterization of the chemical elements, through an ICP-MS analysis of the Coemin dam with 30 million tons of tailings. A methodology is developed to prioritize the elements to be recovered, through a selection matrix; considering prices, demand, supply risk, technology efficiency, cost of technology, and earnings per material tons. Under this methodology, it is selected: Gallium, Germanium, Cobalt and Copper. The design considers a hydrometallurgical process with a collective flotation stage and autoclave reactor and a separation of each value element, by means of solvent extraction, and then by means of purification methods. Copper, Gallium and metallic Cobalt are extracted, together with Germanium oxide. The feasibility of the project was analysed making an economic study of the case, showing that the project has a net present value of 122 million dollars and an internal rate of return of 22%, also this project seeks to be framed in a B Corporation business model.

With this proposal a new business model for the country is proposed, which in turn will help with one of the biggest environmental crisis of this, the mine tailings. Mining environmental liabilities are a national priority in various areas, such as environmental, legislative, technological, among others. At the same time, the thesis seeks to have an economic impact by diversifying the product matrix, as well as a market with sustained demand and few suppliers.

El mejor poeta es el hombre que nos entrega el pan de cada día: el panadero más próximo, que no se cree dios. El cumple su majestuosa y humilde faena de amasar, meter al horno, dorar y entregar el pan de cada día, con una obligación comunitaria. Y si el poeta llega a alcanzar esa sencilla conciencia, podrá también la sencilla conciencia convertirse en parte de una colosal artesanía, de una construcción simple o complicada, que es la construcción de la sociedad, la transformación de las condiciones que rodean al hombre, la entrega de la mercadería: pan, verdad, vino, sueños.

Pablo Neruda, Recepción de premio Nobel de literatura, Suecia 1971

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres, Daphne y Felipe, debido a que gracias a ellos he logrado todo lo que soy el día de hoy, siempre han creído en mí y como lo dije una vez, gracias a ustedes soy la mujer empoderada que no tiene miedo de cumplir sus sueños.

A mis hermanos, Sebastián y Macarena, quienes han sido una fuente de fuerza para siempre salir adelante, ser una mejor persona y poder ser un ejemplo a seguir para ustedes.

A mis amigos de la vida; Alejandra, Paulina G, Natalia, Francisca, Héctor, Hernán, Cecilia, Paulina V y María José, quienes han dado alegría a mi vida y me han apoyado en todo momento.

César, muchas gracias por estar conmigo siempre, por estudiar desde que entre a la Universidad conmigo y pasar muchas noches de desvelo, por siempre creer en mí y ser mi compañero en este viaje.

Finalmente agradecer a mis profesores; a Marco Vera, por su gran preocupación por mi trabajo, por aportar con su experiencia a cada parte de esta tesis y por su gran calidad humana siendo mi supervisor. A Claudio Acuña, agradezco mucho el creer en mí y ser una mente brillante de muchas ideas, que ha podido compartir con todo el equipo, muchas gracias profesor por todas las herramientas que me ha dado. A ambos profesores agradecer su labor de educadores, debido a que son los gestores de cambio de futuras generaciones, siempre tendré en cuenta y en mi rol como profesional y como ser humano, seguiré su ejemplo, para lograr aportar a un cambio que genere una mejor sociedad.

INDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
AGRADECIMIENTOS	5
INDICE	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
I. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1. ANTECEDENTES GENERALES	10
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
3. HIPÓTESIS.....	14
4. OBJETIVOS.....	14
II. CAPÍTULO 2: REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA	15
1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN CHILE.....	15
2. DEFINICIÓN DE MINERALES DE INTERÉS ECONÓMICO Y SU IMPORTANCIA EN EL MERCADO MUNDIAL	20
3. POLÍTICAS PÚBLICAS DEL ESTADO DE CHILE RESPECTO A LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ EXTRACTIVA Y TRATAMIENTO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS	32
4. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA	34
III. CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO DE UN RELAVE NO ACTIVO – TRANQUE COEMIN.....	35
1. DESCRIPCIÓN TRANQUE DE RELAVE	35
2. SELECCIÓN CASO ESTUDIO.....	37
3. ANÁLISIS DE MUESTREO.....	38
4. SISTEMA DE MUESTREO PROPUESTO	40
5. ANÁLISIS QUÍMICOS TRANQUE COEMIN	41
6. CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3	55
IV. CAPÍTULO 4: DISEÑO DE PROCESO BASADO EN CASO ESTUDIO PARA EVALUAR DE MANERA TÉCNICA LA EXPLOTACIÓN DE ELEMENTOS DE INTERÉS ECONOMICO.....	56
V. CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN ECONÓMICA	66
CRITERIOS DE EVALUACIÓN	67
TASA DE DESCUENTO	67

EXPECTATIVA DE VIDA DEL PROYECTO	67
DEPRECIACIÓN DE LOS EQUIPOS	67
INDICADORES DE RENTABILIDAD.....	69
VI. CAPITULO 6: CONCLUSIONES CONTRIBUCIONES Y RECOMENDACIONES	70
CONCLUSIONES.....	70
CONTRIBUCIONES	71
RECOMENDACIONES.....	71
VII. REFERENCIAS.....	73
VIII. ANEXOS	78
1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA MEDIANTE TÉCNICA ICP-MS	78
2. CRITERIOS EVALUACIÓN ECONÓMICA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica del tranque Coemin	35
Figura 2: Relaves depositados en la provincia de Copiapó (Hernández, 2016)	36
Figura 3: Ilustración puntos de muestreo	38
Figura 4: Deposito de relaves convencional (Valdevenito, 2008).....	39
Figura 5: Modelamiento del porcentaje de caserita en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)	40
Figura 6: Análisis de liberación de caserita en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)	41
Figura 7: Tamaño medio de partícula en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)	41
Figura 8: Resultado análisis compuestos químicos	42
Figura 9: Elementos análisis relave Coemin.....	42
Figura 10: Tierras raras presentes en el relave Coemin.....	43
Figura 11: Elementos radioactivos en la caracterización mineralógica	44
Figura 12: Elementos menores	45
Figura 13: Componentes de la matriz de criticidad. Indicadores claves de desempeño para el análisis de criticidad (Key Performance Indicators, KPI).	49
Figura 14: Resumen de la matriz de decisión.....	52
Figura 15: Aporte de cada indicador a los elementos de selección.....	53
Figura 16: Parámetros de diseño	56
Figura 17: Etapas Claves del Diseño de Procesos.....	57
Figura 18: Diagrama Flotación	58
Figura 19: Diagrama Lixiviación Autoclave.....	59
Figura 20: Diseño de proceso	60
Figura 21: Diagrama de flujo de la planta	61
Figura 22: Diagrama de flujo proceso	61
Figura 23: Resumen escenarios estudiados	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: PAM activos de mayor tonelaje. Fuente: Sernageomin 2015	19
Tabla 2: Usos de minerales críticos	20
Tabla 3: Propiedades del Antimonio	22
Tabla 4: Propiedades del Berilio.....	22
Tabla 5: Propiedades de los boratos	23
Tabla 6: Propiedades del Cobalto	23
Tabla 7: Propiedades del Cromo	24
Tabla 8: Propiedades de la Fluorita.....	24
Tabla 9: Propiedades del Galio.....	25
Tabla 10: Propiedades del Germanio	25

Tabla 11: Propiedades del Indio	26
Tabla 12: Propiedades del Magnesio	26
Tabla 13: Propiedades del Niobio	27
Tabla 14: Wolframio.....	27
Tabla 15: Elementos del grupo Platino	28
Tabla 16: Principales países productores de CRM (EU, 2014)	30
Tabla 17: Pronostico del crecimiento medio de la demanda hasta 2020 para materias primas críticas (% por año) (Roskill, 2013)	31
Tabla 18: Proyección de la demanda destinada a tecnologías emergentes (EU, 2014)	31
Tabla 19: Relaves que cuentan con análisis químicos (SERNAGEOMIN, 2016)	37
Tabla 20: Distribución de tipos de tierras raras, en las principales reservas del mundo (Geosciences Australia , 2013)	43
Tabla 21: Resumen análisis al tranque Coemin (CORFO, 2013).....	46
Tabla 22: Porcentajes de recuperación en la fracción magnética	46
Tabla 23: Datos para elaborar la Matriz del relave Coemin.....	49
Tabla 24: Valores asignados a cada parámetro de decisión	51
Tabla 25: Matriz de decisión del relave Coemin	51
Tabla 26: Resumen de elementos seleccionados	54
Tabla 27: Minerales asociados a los elementos de interés.....	54
Tabla 28: Composición alimentación del proceso (CORFO, 2013).....	62
Tabla 29: Casos propuestos.....	62
Tabla 30: Resultado de la propuesta al evaluar el proceso bajo un escenario específico de operación.	63
Tabla 31: Porcentaje cubierto de la demanda mundial	63
Tabla 32: Porcentaje de ingresos por productos	63
Tabla 33: Indicadores flujo de caja.....	69

I. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES GENERALES

La minería es una actividad económica primaria, que puede visualizarse convenientemente como un proceso de suministro, por el cual minerales, se convierten desde recursos geológicos hasta productos negociables o mejor conocidos en inglés, como commodities.

Durante la última década las inversiones en minería han incrementado exponencialmente, por ejemplo, en Perú, las inversiones incrementaron en US\$ 109 millones en 2003 a US\$ 3.5 billones en 2013 (Banco Mundial, 2014) , en el caso de Chile de acuerdo al informe de “Inversión minera en Chile: catastro de proyectos periodo 2017 – 2026”, elaborado por COCHILCO, la inversión en proyectos mineros que se materializarán en este periodo ascienden a US\$ 64.8 billones (Ingeniería de Minas U. de Chile, 2017)

Este flujo de inversiones ha sido bienvenido, para países en zonas de desarrollo, en las regiones de Latinoamérica y África. Sin embargo, el crecimiento económico, asociado a la minería, también plantea retos para los gobiernos en cuanto al manejo de estas inversiones.

Para el desarrollo de proyectos mineros, el banco mundial plantea los siguientes desafíos:

- Responsabilidad social, con relación al medio ambiente y a las comunidades.
- Transparencia económica, con relación a los ingresos recolectados y distribuidos.
- Equitatividad en la distribución de los recursos, para estimular el desarrollo de la economía local y compartir los beneficios con las comunidades.

Chile se ubica como el mayor productor de cobre mundial, con una producción en 2016 de 5.55 millones de toneladas, presentando una caída de 3.9% respecto al año anterior, sin embargo, se proyecta que para 2018, la producción alcance los 6 millones de toneladas. En este contexto es importante considerar las recomendaciones del banco mundial en torno a el desarrollo de futuros proyectos mineros.

Para determinar la factibilidad económica de un recurso minero y que este se convierta en reserva, i.e., una porción del recurso mineral que es económicamente extraíble de acuerdo a un escenario productivo, medioambiental, económico y financiero (CODELCO, 2014) , es necesario llevar a cabo varios tipos de estimaciones para establecer la presencia de minerales con valor económico y las rutas efectivas de extracción de estos.

Los costos, riesgos y ganancias de la economía global del proceso minero, se ven reflejados en las etapas de exploración minera, minería, procesamiento de minerales, energía y transporte. Estos a su vez, son función de la volatilidad del mercado (i.e., oferta, demanda, estabilidad económica, factores de precio) en el contexto global del negocio de la minería.

Los tamaños de los depósitos mineros son fijos y determinados por la exploración geológica, por lo cual esto impone restricciones técnicas y desafíos para la construcción de un plan minero de explotación de la reserva, teniendo que justificarse desde un inicio del proyecto un estudio de factibilidad pertinente a las oportunidades de este. La tasa de producción es un parámetro que se debe considerar en el inicio del proyecto, es decir, por cada tonelada que se extrae, queda una tonelada menos en la mina, que, por consecuente, se representan como producto de interés, o como desecho, representado en relave o ganga. Se define relave, como un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras de concentración, posterior a la etapa de flotación. (SERNAGEOMIN, 2015)

Los recursos minerales, son no renovables, es decir, de naturaleza agotable, es por esto por lo que la proyección de estos es fuente de preocupación, respecto a la escasez mundial de estos recursos, sus límites de crecimiento y el rol fundamental de la minería en el desarrollo económico. Debido a este escenario, existe un desafío constante de buscar fuentes alternativas de valor, tales como el re procesamiento de los relaves mineros.

Para comprender la metodología de un ciclo de vida de una reserva minera, es importante visualizar los pasos de la explotación de esta y que se detallaran a continuación:

- *Exploración minera*

En esta etapa inicial se efectúa un reconocimiento general en un área extensa, con el fin de identificar características favorables que puedan indicar la presencia de un yacimiento (Codelco, 2016)

- *Desarrollo y factibilidad del proyecto*

Posterior a la etapa de exploración minera, se debe tomar una decisión respecto a si el depósito mineral debe o no ser desarrollado para la producción, en esta etapa se establece la capacidad o tasa de extracción y el diseño de procesamiento del mineral. El diseño de proceso es fundamental para incrementar la productividad de la mina, además en el estudio de factibilidad se debe considerar la factibilidad económica, ambiental y cierre de faena.

- *Producción*

La producción minera es el último paso del ciclo de vida de una reserva minera, en esta se utilizan los parámetros y procesos previamente diseñados. Para operaciones de metales base, la etapa de procesamiento normalmente incluye chancado, molienda, flotación, secado, disposición de relaves y la carga de concentrados para su transporte. Por ejemplo, el mineral con valor económico contenido en la mena, con un 1% Cu puede enriquecerse a un concentrado de cobre de 25% Cu, con una pérdida de 10% del cobre contenido en el mineral en el relave (90% de recuperación)

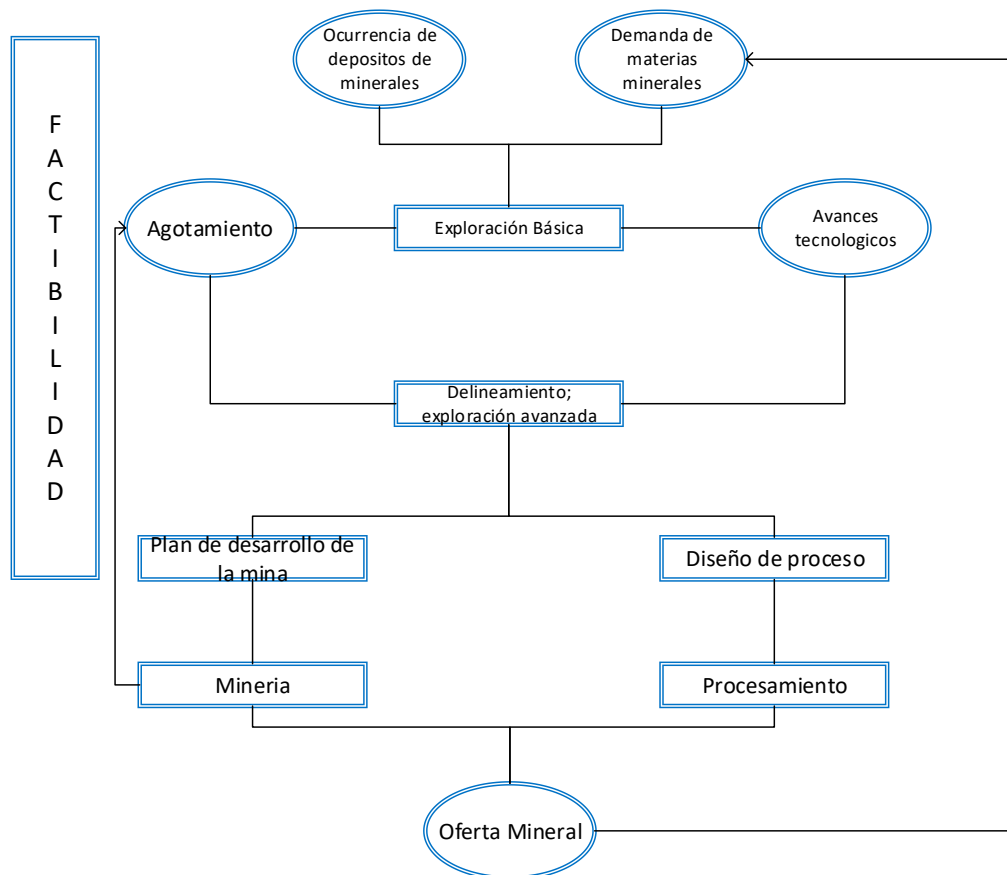


Figura 1: Etapas de un proyecto minero (CEC U Chile, 2016)

La flotación es una técnica de procesamiento para minerales sulfurados. La primera etapa para la realización del proceso de flotación corresponde al chancado. El chancado es un proceso de conminución en donde se homogenizan los fragmentos de roca que provienen de la mina a un máximo de ½ pulgada. La segunda etapa corresponde a la Molienda, la cual es el proceso que recibe los fragmentos homogenizados del chancado para seguir reduciendo su tamaño y conseguir una granulometría máxima de 180 micrones.

La Flotación o concentración es un proceso fisicoquímico que permite la separación de los minerales de la roca. La roca molida de 180 micrones es mezclada con reactivos que forman una pulpa la cual es depositada en piscinas de flotación. Los reactivos que se incorporan en la molienda tienen diferentes naturalezas. Existen los reactivos espumantes, reactivos colectores,

reactivos depresantes, reactivos reguladores de pH. Luego de varios ciclos en que las burbujas rebasan el borde de las celdas, se obtiene el concentrado con porcentaje de 30% en el caso del cobre. El concentrado final es secado mediante filtros y llevado al proceso de fundición. Todo lo que no es mineral concentrado se denomina Relaves, el cual es separado sólido -líquido (Espesado-Filtro) y se deposita en un lugar cercano a la faena.

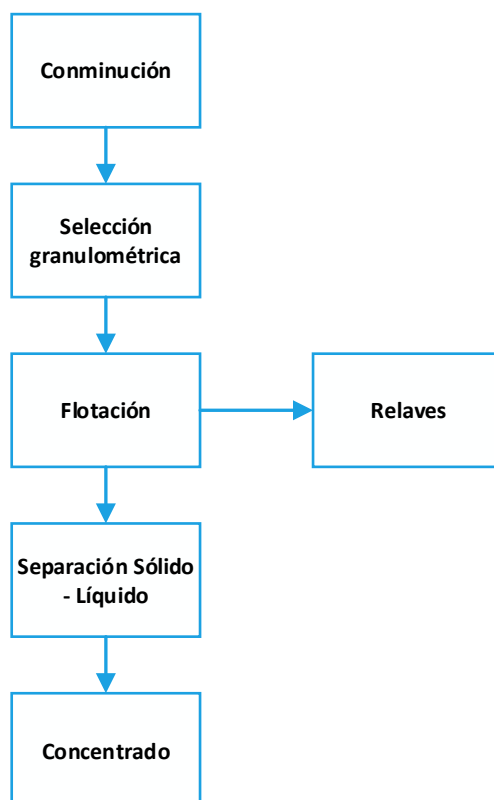


Figura 2: Diagrama de un proceso de concentración minerales de cobre

Es el caso de los relaves. Durante décadas, las grandes faenas mineras arrojaban toneladas de material con buena ley, en algunos casos, cercanas a 0,5%. Esta ley es considerada hoy como económicamente explotable, por lo que algunas incluso están volviendo a procesar esos desechos para extraer todo el cobre que todavía queda.

En los relaves de Chile, no solamente se encuentra cobre, también otros minerales, de los cuales muchos de ellos son escasos y tienen importancia económica estratégica, puesto que sus principales aplicaciones corresponden a tecnologías de punta en la industria aeroespacial, automotriz, médica, óptica, electrónica de consumo, baterías y una serie de aplicaciones en energías renovables.

Bajo los antecedentes planteados, se busca realizar una investigación del potencial económico de relaves mineros para la diversificación de la matriz de extracción chilena.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Chile un país minero por excelencia, posee el desafío de lograr diversificar la matriz de extracción de minerales y crear nuevos negocios. En los próximos 10 años, Chile poseerá más de 15 billones de metros cúbicos de relaves, por lo que, la innovación y desarrollo tecnológico en torno a estos recursos se presenta como oportunidad atractiva. En paralelo a la situación nacional, existe un escenario mundial concreto, sobre la inminente busque de reservas de un grupo de minerales llamados, minerales estratégicos.

Bajo estos supuestos, el trabajo de tesis busca realizar un levantamiento de antecedentes asociados y un estudio de ingeniería básica, para ver la oportunidad de lograr identificar el valor asociado a minerales estratégicos, en relaves mineros en Chile.

3. HIPÓTESIS

Es posible identificar el valor asociado a minerales estratégicos presentes en relaves mineros chilenos, a través de una herramienta para la priorización de elementos que permita determinar opciones de diseño de procesos económicamente factible.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta que permita Diseñar un proceso técnica y económicamente factible que permita agregar mediante la extracción de elemento estratégicos valor a pasivos ambientales mineros

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar e identificar oportunidades de valorización de residuos mineros, tendencias de mercados en minerales estratégicos y tecnologías adaptables para la extracción
2. Desarrollar e implementar en un caso estudio una metodología para la selección de elementos a extraer
3. Implementar un proceso para la extracción de minerales seleccionados y realizar un análisis de factibilidad técnica aplicado a un caso estudio considerando procesos alternativos.
4. Realizar un análisis de factibilidad económica del proceso diseñado.

II. CAPÍTULO 2: REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

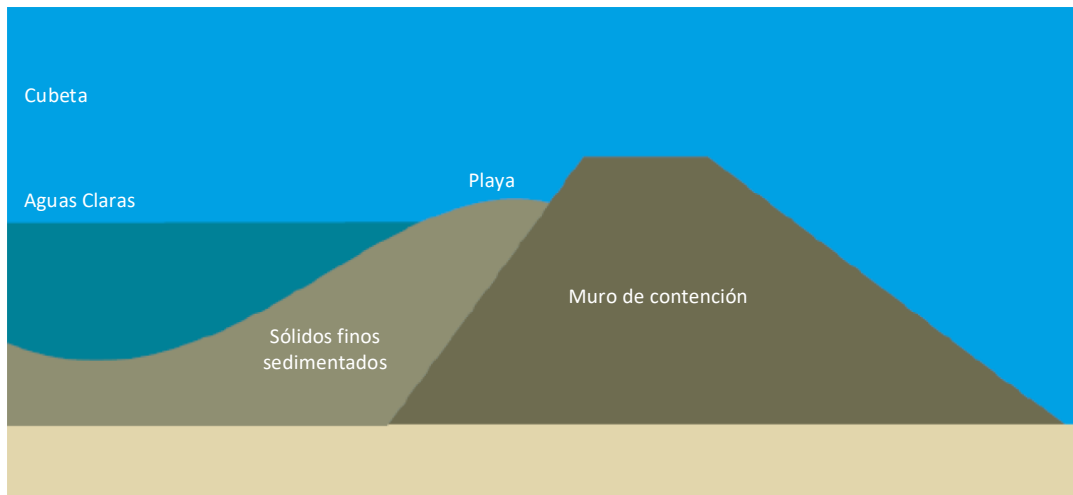
1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN CHILE

Actualmente Chile cuenta con 9.25 billones de toneladas de relaves depositados, esto representa un volumen de 6.9 billones de metros cúbicos, además, el volumen aprobado para depósitos de relaves a la fecha es de 15.5 billones de metros cúbicos (SERNAGEOMIN, 2016). Si realizamos un ejemplo para sensibilizar la cantidad de relaves en nuestro país y consideramos expandir este volumen en una superficie de un metro de alto, esta alcanzaría más de 15.000 kilómetros cuadrados, por lo tanto, tendría una superficie similar a toda la región metropolitana.

Para lograr comprender la situación actual de los pasivos ambientales mineros en el contexto nacional, es importante revisar la definición expuesta por SERNAGEOMIN, organismo que define pasivo ambiental minero PAM como *“aquella faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente”* (Congreso Nacional, 2014). Esta entidad gubernamental es la encargada de realizar un catastro anual de depósitos de relaves, identificando cinco tipos depósitos de relaves que serán descritos a continuación:

- *Tranque de Relaves*

Un tranque de relaves, es el área ocupada por los desechos de roca molida, minerales, agua, metales pesados y otros elementos reactivos químicos que se ocupan para la extracción minera, tales como cianuro, colectores, espumantes, depresantes, floculantes, entre otros, que se obtienen como producto de los procesos de concentración de minerales. Estos relaves se depositan en forma de pulpa, en donde el material sólido va decantando en forma segregada, en el fondo de una laguna artificial, se clasifican entre relave seco y piscinas de relaves, en el caso del relave seco se forman verdaderos valles de estos depósitos. En la actualidad existen más 567 tranques de relaves en el país (SERNAGEOMIN, 2016), conllevando a un problema mayor para la viabilidad de los proyectos mineros presentes y futuros.



Fuente: SERNAGEOMIN, 2016.

Figura 3: Estructura de un tranque de relaves

- *Embalse de Relave*

Es aquel depósito de relaves donde el muro de contención está construido con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno (SERNAGEOMIN, 2016). La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintético como geomembrana de alta densidad. También se llama Embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención. Según el catastro de relaves 2016, en Chile existen 105 embalses de relaves, en donde la mayoría están ubicados en la III y IV región.



Figura 4: Vista aérea del embalse cauquenes, VI región, Chile (SERNAGEOMIN, 2016)

- *Relave Espesado*

Es el depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua que contienen, proceso de gran importancia considerando el contexto hídrico nacional. El depósito

de relave espesado cuenta con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente que pudiese fluir fuera del depósito.

- *Relave Filtrado*

El relave filtrado tiene características muy similares al relave espesado, sin embargo, la forma de recuperar el agua se realiza mediante filtros exclusivamente, siendo la humedad un parámetro de operación que no puede sobrepasar el 20%. El agua recuperada de este tiene calidad de agua de procesos.

Los relaves filtrados, apuntan al termino *NST*, conocido por sus cifras en inglés, *non segregated tailings*. Los NST son relaves que han sido tratados significativamente para formar una masa homogénea y semi-cohesiva cuando se depositan. El proceso de remoción de agua se logra agregando dos pasos a nuestro proceso original: utilizamos ciclones para separar la arena gruesa y los espesadores para capturar y eliminar el agua de los finos en la corriente de relaves antes de enviarlos al estanque de relaves. La arena gruesa y el subdesbordamiento del espesante se mezclan y se combinan con CO₂, que se ha demostrado que acelera la sedimentación de los finos y NST como un todo (CNR, 2016)

- *Relave en pasta*

Solo existen 4 depósitos de relaves en pasta en el país, estos se caracterizan por ser una mezcla de agua con sólidos, que contienen una cantidad significativa de partículas finas con un contenido de agua bajo, de modo de crear una consistencia similar a la pulpa de alta densidad. (SERNAGEOMIN, 2016).

Los relaves en pasta son relaves con un porcentaje de sólidos mayor al relave filtrado, como se ve ilustrado, por lo cual también son considerados como NST o relaves no segregados. Su principal ventaja es la disminución de riesgos asociados a colapsos de tranques, debido a la estabilidad geofísica que estos poseen.

Los costos de operación para la preparación y el transporte de la pasta pueden ser más altos, pero el costo de la vida útil de la mina. Debido a la disminución del impacto ecológico, por la estabilidad y menor volumen de almacenamiento como causa de la disminución de agua en las presas de relaves podrían ser directamente proporcional con el aumento de la vida útil de una faena minera. (Fourie, 2012)

Actualmente Sernageomin es el organismo encargado de tener un catastro y de fiscalizar los pasivos ambientales mineros (PAM) en Chile, este seguimiento se realiza en conjunto con la proclamación de la ley 20.551, del año 2012 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras (Congreso Nacional, 2014)

Los pasivos ambientales mineros representan una preocupación para el estado, debido principalmente al daño de los ecosistemas en donde se emplaza la actividad minera. La contaminación por arsénico, cianuro y metales pesados es uno de los principales problemas que conllevan los pasivos ambientales mineros, a su vez estos pueden representar un riesgo a la seguridad por la estabilidad física de las instalaciones remanentes. Los relaves acumulados en zonas lluviosas y húmedas representan el mayor peligro para poblaciones y ecosistemas cercanos, debido a la constante humedad proveniente de la lluvia se genera inestabilidad geomecánica en el relave (licuefacción) y la estructura del depósito. Estos lugares de almacenamiento mantienen la humedad interna aun cuando la faena minera haya sido clausurada o paralizada. Es durante eventos de lluvia intensa o fuerte actividad sísmica que se han producido algunos de los mayores desastres de los depósitos de relaves mineros costando un elevado número de vidas humanas, siendo el colapso del tranque de relaves de la mina Semarco, faena que concentra el 2% de la producción de hierro mundial y es operada por Vale y BHP Billiton, uno de los más recordados de la década, por su nivel destrucción y por cobrar la vida de 17 personas (Mining Press, 2015)

Chile es el segundo país en el mundo con mayor tasa de incidentes por relaves mineros, reportando un total de 19 accidentes a lo largo de su historia.

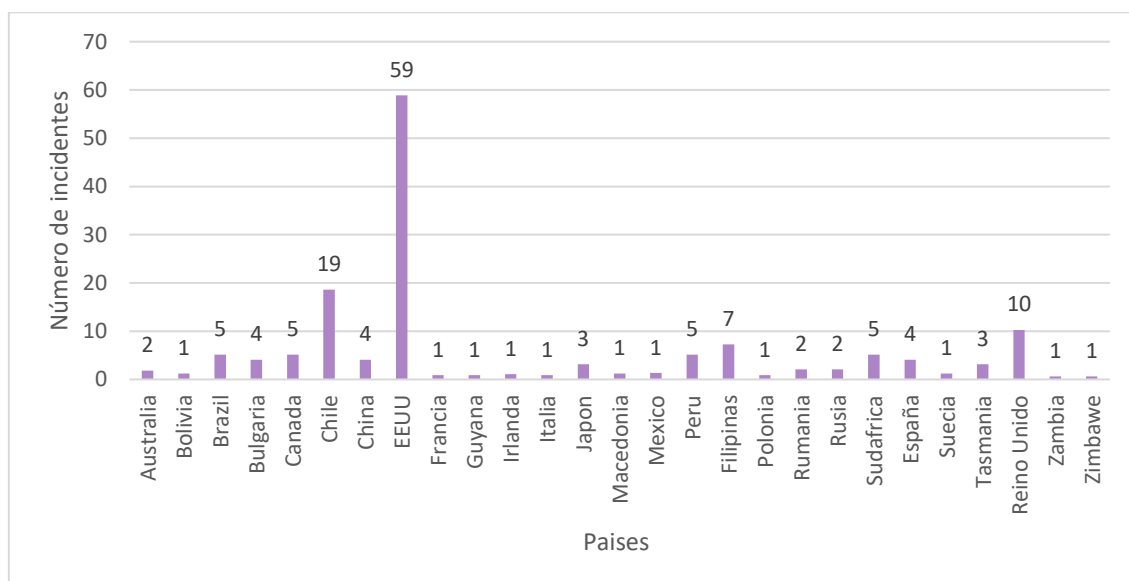


Figura 5: Número de accidentes producidos por relaves mineros en el mundo (Benito, 2008)

Actualmente la legislación ambiental del país sobre temas relacionados con pasivos ambientales mineros ha progresado, sin embargo, aún falta mucho por legislar para alcanzar estándares similares a nuestros pares de la OCDE.

Bajo este contexto, es importante identificar las principales operaciones mineras que generan relaves en el país, viendo a las empresas encargadas de estas faenas como posibles interesados en generar negocios y tecnologías que puedan agregar valor a sus depósitos. En la Tabla 1 se puede apreciar, que Codelco y Minera Escondida, operada por BHP, son las principales empresas generadoras de relaves, teniendo aprobados a la fecha, un tonelaje en sus depósitos que suma más de 8.5 billones de toneladas.

Tabla 1: PAM activos de mayor tonelaje. Fuente: Sernageomin 2015

EMPRESA	FAENA	REGION	DEPOSITO	TONELAJE APROBADO
MINERA ESCONDIDA LTDA.	ESCONDIDA	II	LAGUNA SECA	4.500.000.000
CODELCO	CHUQUICAMATA	II	TALABRE	2.103.950.000
CODELCO	ANDINA	RM	OVEJERIA	1.930.000.000
MINERA LOS PELAMBRES	FAENA LOS PELAMBRES	IV	EL MAURO	1.700.000.000
SCM SIERRA GORDA	PROYECTO SIERRA GORDA	II	SIERRA GORDA	1.350.000.000
CIA. MINERA DOÑA INES DE COLLAHUASI	COLLAHUASI	I	PAMPA PABELLON	1.040.000.000
ANGLO AMERICAN	LOS BRONCES	RM	LAS TORTOLAS	1.000.000.000
CIA. MINERA CENTINELA	PROYECTO ESPERANZA	II	PROYECTO ESPERANZA	750.000.000
MINERA LUMINA COPPER CHILE LTDA.	CASERONES	III	DEPOSITO DE ARENAS	570.000.000
CIA. CONTRACTUAL MINERA CANDELARIA	CANDELARIA	III	CANDELARIA	484.664.667

Debido a la situación actual del país y el incremento proyectado de la minería en Chile, los pasivos ambientales mineros se presentan como una oportunidad de negocio a analizar, en base a esto, se considera realizar un análisis a casos de empresas dedicadas a la extracción de valor a través de relaves mineros.

De Beer Consolidates Mines (DBMC) es una compañía minera dedicada a la extracción de minerales a partir de relaves en Sudáfrica, esta empresa tiene como horizonte procesar 360 millones de toneladas, entre los años 2013 y 2030. DBMC en su primer año de operación recupero 815.036 quilates de diamantes a partir de 6.133.799 toneladas de relaves, dentro de los procesos que menciona la empresa que utiliza, se destaca un sistema avanzado de molienda, concentración y separación, debido a que el mineral de valor, diamante, se encuentra ocluido en los relaves que están procesando.

Otro Proyecto exitoso por mencionar, es la faena Las Lagunas, Pueblo viejo, ubicado en República Dominicana, este proyecto operado por la empresa australiana Panterra Gold, considera operar 5.137 millones de toneladas de relave, para extraer plata y oro, comenzando

sus faenas en el año 2012. El depósito tiene concentraciones de oro de 3,8 g/t y de plata de 38,6 g/t.

En el contexto nacional, Minera Valle Central, empresa de la filial Amerigo Resources, es una compañía que extrae cobre y molibdeno a partir de los relaves de la empresa CODELCO, división El Teniente y que, a su vez, devuelve al tranque Cauquenes los relaves ya reprocesados. Minera Valle Central (MVC) comenzó sus operaciones en el año 1992, siendo expandida la capacidad de la planta a 100.000 tpd en 1997, en 2005 se genera nuevamente un aumento de la capacidad de procesamiento a 200.000 tpd. En un estudio publicado por la empresa el año 2006, la reserva a explotar contaba con aproximadamente 214 millones de toneladas de relave con una ley de cobre 0.262% y 0.01% de molibdeno. (Moss, 2006)

2. DEFINICIÓN DE MINERALES DE INTERÉS ECONÓMICO Y SU IMPORTANCIA EN EL MERCADO MUNDIAL

Los minerales estratégicos, cumplen un rol esencial en la economía, debido a que son fundamentales para el desarrollo tecnológico, como se muestra en la Tabla 2: Usos de minerales críticos La Unión Europea a partir de 2010, ha desarrollado y publicado una lista cada dos años de minerales estratégicos, en inglés, Critical Raw Materials (CRM).

La lista de CRM tiene como objetivo fijar lineamientos y políticas públicas, para lograr captar la atención mundial en el tema y desarrollar diversos planos de acción para abordar el problema, donde se destaca el incremento de fondos de la Unión para investigación y desarrollo para la exploración y extracción de CRM.

Los minerales estratégicos, tienen un interés que trasciende al ámbito mundial, esto se debe principalmente a que son clave para el desarrollo de los siguientes productos:

Tabla 2: Usos de minerales críticos

<i>Principales usos de los minerales estratégicos</i>
Elementos de defensa militar (Misiles de alta precisión, aviones, submarinos, radares)
Desarrollo de energías limpias (Paneles fotovoltaicos, energía eólica, mareomotriz)
Tecnología diaria; Celulares, televisores, refrigeradores, cámaras, computadores
Vehículos híbridos y eléctricos
Imanes de alto poder
Tecnología espacial

Actualmente China, concentra el 85% del mercado de los minerales estratégicos, siendo representada la situación en una frase que se cita del mandatario chino Den Xiaoping *“En el medio Oriente tienen petróleo y China tiene minerales Raros”*, siendo esta frase una representación del modelo de negocios chino. Este modelo de negocios busca priorizar el desarrollo de aparatos tecnológicos en suelos chinos y no exportar los minerales para que este desarrollo se realice en China. Un ejemplo de esto, son las industrias americanas, que han debido migrar a China debido a que es la única forma de poder contar con estos minerales, siendo esta una situación que expone el Know – How del desarrollo tecnológico de potencias como Estados Unidos, Japón o Europa.

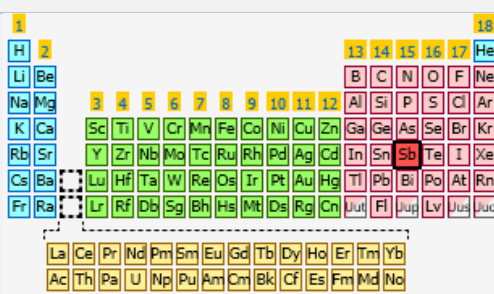
El problema fue denunciado por el entonces presidente de Estados Unidos, Barak Obama, en el 2010 a la WTO (World Trade Organization) y en este año fue creada la primera lista oficial de C.R.M. por la Unión Europea. En 2010, la tensión llegó a su máximo punto, luego que existiera un choque entre un barco pesquero japonés y uno chino, provocando tensión entre ambos países, a lo que China respondió con una suspensión de ventas a Japón de C.R.M por un trimestre⁶, dejando a dicho país en una situación extremadamente vulnerable para su industria y desarrollo.

A partir de los antecedentes planteados, la posibilidad de desarrollar tecnologías de extracción de minerales estratégicos (i.e., C.R.M) en Chile, se plantea como una solución viable al problema de riesgo de suministro de estos, debido a la estabilidad política y económica del país y su reputación como líder en minería.

Los minerales estratégicos, son elementos valiosos en el proceso de producción, es por esto por lo que los mercados y las naciones se encuentran en una constante búsqueda de encontrar sustitutos a estos. Dentro del informe de políticas públicas de los C.R.M (Comisión minerales Unión Europa, 2013), esfuerzos se han hecho para reemplazar los minerales estratégicos por otros elementos que no se encuentren en esta situación. Sin embargo, en la opinión de la autora de esta memoria hay espacio para mejorar los procesos de extracción de los C.R.M y de esta forma incrementar su producción global.

A continuación, se presenta una descripción de los C.R.M, en donde se detallan los siguientes aspectos: ubicación en la tabla periódica, electronegatividad y dureza, como principales propiedades químicas, además se muestran propiedades de mercado, como el precio, toneladas de producción y países productores.

Tabla 3: Propiedades del Antimonio

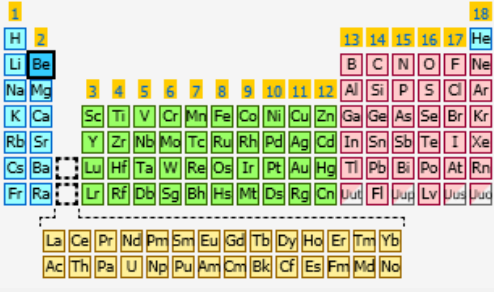
ANTIMONIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	121,70 (RSC, 2017)																
Electronegatividad	2,05 (RSC, 2017)																
Dureza	3 (RSC, 2017)																
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza	9,26 [USD/kg] (Mineral Prices, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	158.000 MT (USGS, 2016)																
Principal productor	China (USGS, 2016)																

El **Antimonio** está clasificado como un metal menor, de importancia estratégica. En la Tabla 3 se puede observar su posición en la tabla periódica, además de propiedades químicas pertinentes para comprender el comportamiento de este. En conjunto se pueden apreciar datos de mercado con un precio que actualmente bordea los 9 [USD/kg] y una producción en donde China concentra el 90% de la producción de este mineral.

Los principales usos para el antimonio se encuentran en la industria química y de aditivos, siendo un retardante de fuego en componentes plásticos. Las aleaciones de antimonio son utilizadas para la producción de baterías, balas y revestimiento de fibra óptica.

China posee impuestos de importación de antimonio, tanto en concentrado como en cátodos. Por otra parte, Rusia y Sudáfrica también poseen un impuesto a la exportación de antimonio, tanto para sus productos como para sus escorias y desechos (Critical Raw Materials, 2016). Actualmente Chile no posee producción de Antimonio, ni proyectos asociados.

Tabla 4: Propiedades del Berilio

BERILIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	9.012 (RSC, 2017)																
Electronegatividad	1.57 (RSC, 2017)																
Dureza	5.5 (RSC, 2017)																
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza	912 [USD/kg] (SMM, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	220 MT (USGS, 2017)																
Principal productor	E.E.U.U (USGS, 2017)																

El **Berilio** es un elemento de vital importancia para las aleaciones, con una densidad 30% más baja que el aluminio y tres veces más rígido que el titanio (CRM, 2017).

Dentro de los usos del berilio, se destacan sus aplicaciones en equipos médicos de alta complejidad, equipos de rayos X y resonancia magnética. Se realiza una aleación de 2% berilio con cobre, creando un material con excelentes propiedades conductoras de calor y electricidad, que resiste deformación a elevadas temperaturas. Las principales industrias que dependen del berilio son, industria automotriz, aeroespacial, equipos médicos y defensa militar, siendo destinada el 20% de la producción de Estados Unidos, exclusivamente a el depósito de defensa nacional (USGS, 2016). Actualmente no existe producción de berilio en Chile.

BORATOS																		
1																	18	
H	2											13	14	15	16	17	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	Lanthanides	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Jl	Fl	Jl	Lv	Jl	Jl

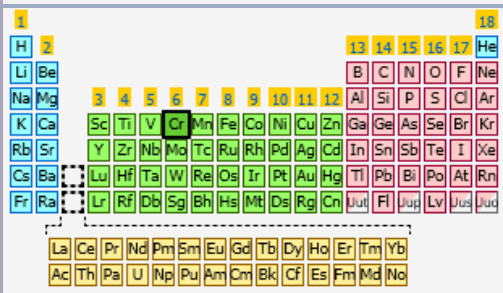
Turquía posee el 73% de las reservas de boratos en el mundo. Sus usos principales son en el mercado de la agricultura, pues es usado como fertilizante, además, por razones de seguridad, el uso de boratos es esencial en las centrales nucleares.

El **Cobalto** se encuentra naturalmente asociado a depósitos sulfurados de níquel y cobre, por lo tanto, se extrae con más frecuencia como un subproducto de estos. Según el *Cobalt Development Institute*, alrededor del 48% de la producción de cobalto se origina en minerales de níquel, 37% en minerales de cobre y 15% en la producción de cobalto primario. Los minerales principales del cobalto son cobaltita, eritrina, glaucodotita, y escuterudita. (Balance, 2015)

Para el contexto nacional, el cobalto cumple un rol fundamental para el desarrollo de la industria de baterías de litio que se proyecta para Chile, debido a que el negocio se tornaría más estratégico si el litio y cobalto pueden tener una fuente estable de origen nacional. Como se aprecia en la Tabla 6 123.000 toneladas de cobalto fue la producción mundial de 2016, siendo un 2.4% menor al año anterior.

Propiedades Químicas																		
Peso molecular	58,93 (RSC, 2016)																	
Electronegatividad	1,88 (RSC, 2016)																	
Dureza	4 (RSC, 2016)																	
Productos y precios																		
Cátodo 99.9% pureza	59,7 [USD/kg] (LME, 2017)																	
Datos de mercado																		
Producción Mundial	123.000 (USGS, 2017)																	
Principal productor	Congo (USGS, 2017)																	

Tabla 7: Propiedades del Cromo

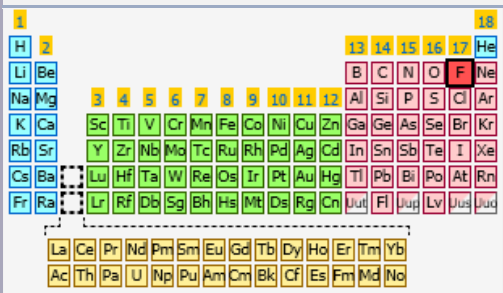
CROMO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	51,99 (RSC, 2016)																
Electronegatividad	1,66 (RSC, 2016)																
Dureza	8,5 (RSC, 2016)																
Productos y precios																	
Aleación Ferro - Cromo	1,996 (Mineral Prices, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	30.400 (USGS, 2017)																
Principal productor	Sudáfrica (USGS, 2017)																

El **Cromo** es el elemento más abundante del Grupo 6, se extrae de la cromita (mineral de cromo). Como se puede observar en la Tabla 7 los mayores depósitos de cromo están ubicados en Sudáfrica, país que concentra el 70% de las reservas mundiales, el porcentaje remanente se concentra principalmente en Kazajstán, Zimbabue, India y Turquía.

El cromo (Cr) tiene una amplia gama de usos en metales, productos químicos y refractarios. Es uno de los materiales estratégicos y críticos más importantes para diferentes tipos de industrias. El uso de cromo en hierro, acero y aleaciones no ferrosas mejora la templabilidad y la resistencia a la corrosión y oxidación. El uso de cromo para producir acero inoxidable y aleaciones no ferrosas son dos de sus aplicaciones más importantes. Otras aplicaciones son en acero de aleación, chapado de metales, pigmentos, procesamiento de cuero, catalizadores, tratamientos de superficie y refractarios. (CRM, 2016).

Chile no posee producción de cromo, sin embargo, es un importador de productos de aceros, con más de 350.000 toneladas en 2016

Tabla 8: Propiedades de la Fluorita

FLUORITA																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	18,99 (RSC, 2017)																
Electronegatividad	3,98 (RSC, 2017)																
Dureza	4 (RSC, 2017)																
Productos y precios																	
Grado metalúrgico	0,28 [USD/kg] (INMIN, 2017)																
Grado ácido	0,47 [USD/kg] (INMIN, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	4.400 MT (USGS, 2017)																
Principal productor	China (USGS, 2017)																

La **Fluorita** se puede encontrar en vetas hidrotermales que contienen plomo y zinc. China concentra más del 50% de la producción, sin embargo, a partir del año 2000 la exportación de la fluorita desde China a otras naciones ha decrecido, principalmente por la demanda interna y las restricciones de exportación.

Hay dos grados comerciales principales de fluorita: Grado metalúrgico (60-96% CaF₂); y fluoruro de calcio (+ 97% de CaF₂). Para el grado metalúrgico se destina el 45% de la producción total, siendo su principal uso en la industria de la producción de acero (CRM, 2016)

Para el caso del grado ácido, la se utiliza el 55% de la producción mundial de flúor, siendo su principal uso en la producción de fluoruro de aluminio y ácido fluorhídrico, que es la fuente primaria de todos los compuestos fluorclorocarbonados. Chile no posee producción de fluorita.

Tabla 9: Propiedades del Galio

GALIO																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular		69,72 (RSC, 2016)															
Electronegatividad		1,81 (RSC, 2016)															
Dureza		1,5 (RSC, 2016)															
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza		115 (Price Metal, 2017)															
Datos de mercado																	
Producción Mundial		470 MT (USGS, 2017)															
Principal productor		China (USGS, 2017)															

Los compuestos de **Galio** se encuentran en trazas en minerales de zinc y bauxita. El galio se utiliza principalmente para la fabricación de arseniuro de galio (i.e., GaAs). El arseniuro de galio es ampliamente utilizado para chips de radiofrecuencia en comunicaciones móviles y satelitales, sistemas de 3G, 4G y 5G, para diodos láser en sistemas de comunicación basados en fibra óptica, para LEDs en displays, aplicaciones automotrices y de iluminación, sensores en sistemas aeronáuticos, espaciales y de defensa (USGS, 2017).

Aproximadamente el 80% de la producción de galio se encuentra en China, siendo su producto comercial el galio metálico, en forma de cátodo con un 99% de pureza, este tiene un precio de 115,3 USD/kg.

El arseniuro de galio se presenta como un producto potencialmente estratégico para las proyecciones energéticas de Chile, quien busca posicionarse como una “potencia solar”, debido a que este, al ser usado en celdas fotovoltaicas puede tener una eficiencia de conversión energética de un 50%, siendo mucho mayor a las tradicionales celdas de silicio con eficiencias de 15% (MIT, 2015)

Tabla 10: Propiedades del Germanio

GERMANIO																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular		72,4 (RSC, 2016)															
Electronegatividad		2,01 (RSC, 2016)															
Dureza		6 (RSC, 2016)															
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza		1130 [USD/Kg] (Price Metal, 2017)															
Oxido de Germanio		1400 [USD/Kg] (Price Metal, 2017)															
Datos de mercado																	
Producción Mundial		160.000 (USGS, 2017)															
Principal productor		China (USGS, 2017)															

El mineral de **Germanio** es muy escaso, se puede encontrar en pequeñas cantidades como germanita y argirodita. En la actualidad la extracción de germanio se asocia a un subproducto de la extracción de zinc y carbón. El 75% de la producción proviene de la esfalerita (i.e., ZnS).

Los principales usos del Germanio tienen relación con su importancia en la producción de fibra óptica, infrarrojo y polimerización de plásticos. Dentro del ámbito energético, el germanio se presenta como un elemento indispensable en la elaboración de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. Al igual que el galio, la extracción de este producto en Chile, cumple con un rol estratégico fundamental, para los planes de convertir el país en un protagonista de la producción de energía solar.

Como se puede observar en la Tabla 10, el principal productor de germanio es China con un precio de 1130 USD/kg.

Tabla 11: Propiedades del Indio

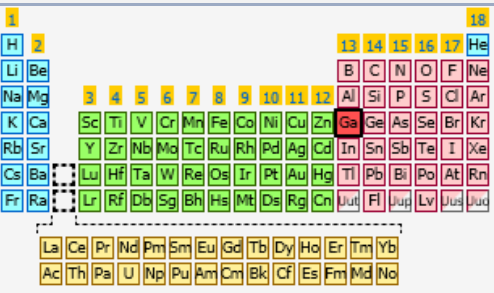
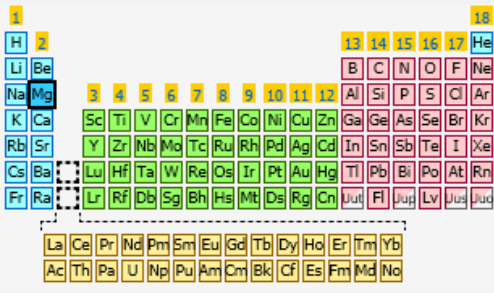
INDIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	114,81 (RSC, 2017)																
Electronegatividad	1,78 (RSC, 2017)																
Dureza	1,2 (RSC, 2017)																
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza	180 [US\$/kg] (Price Metal, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	700 MT (USGS, 2017)																
Principal productor	China (USGS, 2017)																

Tabla 12: Propiedades del Magnesio

MAGNESIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular	24,71 (RSC, 2016)																
Electronegatividad	1,31 (RSC, 2016)																
Dureza	2,5 (RSC, 2016)																
Productos y precios																	
Cátodo 99% pureza	2,06 [USD/kg] (Mineral Prices, 2017)																
Datos de mercado																	
Producción Mundial	27.700 MT (USGS, 2017)																
Principal productor	China (USGS, 2017)																

El **Indio** se puede encontrar en minerales asociados al zinc, plomo, estaño y cobre. El 55 % de la demanda mundial de indio se utiliza en Asia, para la producción de pantallas planas de diversos artículos de tecnología. En el caso del 45% restante, se utilizan para artículos mecánicos y electrónicos. Debido a esto, existen plantas dedicadas a extraer indio desde los residuos de tecnología, o como se conoce en inglés, Waste of electrical and electronic equipment (WEEE). Es importante mencionar que este proceso es actualmente conocido como *Minería Urbana* ¹

La producción mundial de Indio es de 700 toneladas métricas, creciendo en un 20% en los últimos tres años. El principal productor de este elemento es China.

Actualmente Chile no es productor de Indio, ni tiene proyectos asociados a este elemento.

El **Magnesio** es el sexto elemento más abundante en la corteza terrestre, como se puede apreciar en la Tabla 12, China es el principal productor de Magnesio con el 85% de la producción mundial.

Las aleaciones de magnesio son materiales de elección para los nuevos conceptos de vehículos, tales como eléctricos, hidrógeno y automóviles inteligentes, debido al bajo peso y alta resistencia del material.

El magnesio es uno de los principales elementos de aleación para aleaciones de aluminio que proporcionan, p. propiedades únicas de latas de aluminio, aeroespacial y aplicaciones de transporte y sustitución técnicamente no es factible.

El cloruro de magnesio, también conocido como Boscosita, es una de las sales que precipitan durante el proceso de concentración de la salmuera en los sistemas de pozas en el Salar de Atacama. Esta sal se comercializa y es utilizada principalmente para mitigar la emisión de polvo en caminos de faenas mineras u otros no pavimentados.

¹ <https://mineriaurbana.org/>

Tabla 13: Propiedades del Niobio

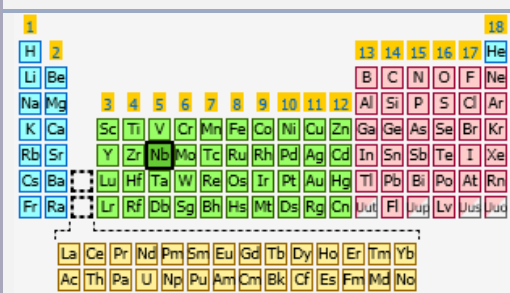
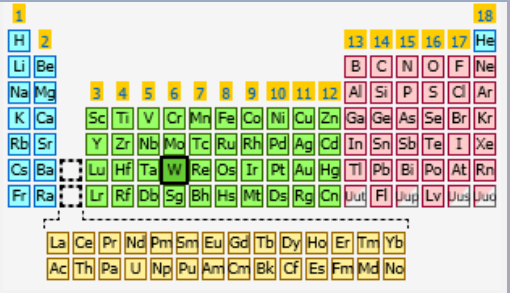
NIOBIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular		92,96 (RSC, 2016)															
Electronegatividad		1,6 (RSC, 2016)															
Dureza		6 (RSC, 2016)															
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza		42 [USD/kg] (Metalary, 2017)															
Datos de mercado																	
Producción Mundial		64.000 MT (USGS, 2017)															
Principal productor		Brasil (USGS, 2017)															

Tabla 14: Wolframio

WOLFRAMIO																	
																	
Propiedades Químicas																	
Peso molecular		183,84 (RSC, 2016)															
Electronegatividad		2,36 (RSC, 2016)															
Dureza		7,5 (RSC, 2016)															
Productos y precios																	
Cátodo 99.9% pureza		30,9 (Infomine, 2017)															
Datos de mercado																	
Producción Mundial		89.400 (USGS, 2017)															
Principal productor		China (USGS, 2017)															

El **Niobio** es un metal de transición cuyas propiedades químicas son muy similares al Tántalo. La manera más común de ser encontrado es en el mineral pirocloro.

Más del 90% de niobio es utilizado en aceros, siendo su principal uso en la refinación de granos, donde en pequeñas adiciones (200 – 1000 g/t) aumenta la resistencia y tenacidad. Esta propiedad es utilizada en cañerías de alta resistencia e industria automotriz.

El niobio es utilizado en super aleaciones, ya que este presenta un alto punto de ebullición y baja densidad relativa. La demanda de esta aleación es principalmente de industrias aeronáuticas y aeroespaciales.

Su alta conductividad lo hace fundamental para la producción de imanes superconductores, siendo utilizado en equipos de resonancia magnética y aceleradores de partículas. Chile no posee producción de Niobio.

El **Wolframio** (i.e., Tungsteno) tiene el punto de ebullición más alto de todos los metales, es por esto por lo que se utiliza en aleaciones para aplicaciones de alta capacidad térmica, tales como electrodos de soldadura por arco, elementos de calefacción y hornos de alta temperatura. Se utiliza en electrónica como recubrimiento de aparatos y en uniones. Debido a estos usos, el wolframio se muestra como crítico para el desarrollo de las industrias automotriz, aeroespacial, de tecnología médica y energética.

China es el principal productor de wolframio, otros países productores son Austria, Bolivia y Canadá.

Debido a la demanda interna de este elemento, China ha disminuido sus exportaciones de wolframio, mostrando una baja de 15.700 MT exportadas en 2012 a 15.400 en 2013. Actualmente Chile no es productor de Wolframio.

Tabla 15: Elementos del grupo Platino

GRUPO PLATINO			
			
Elemento	Precio [USD/kg] (Price Metal, 2017)	Producción Mundial (USGS, 2017)	Principal productor MT (USGS, 2017)
Platino	31.990	172	Sudáfrica
Paladio	21.669	208	Rusia
Osmio	13.020	1	Sudáfrica
Rutenio	2.733	80	Sudáfrica
Iridio	32.954	7	Sudáfrica
Rodio	27.167	75	Sudáfrica

Los **PGM**, conocidos en su acrónimo en inglés como *Platinum Group Metals*, son un grupo de seis elementos; Platino (Pt), Paladio (Pd), Osmio (Os), Rutenio(Ru), Iridio (Ir) y Rodio (Rh). Estos elementos existen naturalmente en los mismos cuerpos minerales.

La extracción, concentración y refinación de PGM requieren procesos complejos, costosos y altamente energéticos. Por ejemplo, en Sudáfrica, los minerales asociados a PGM tienen un bajo contenido de estos, usualmente entre 2 a 6 gramos por toneladas. Para este ejemplo, toma aproximadamente seis meses procesar entre 10 a 40 toneladas de mineral para producir una onza de platino (Matthey Platinum, 2014). La mayoría de las minas que operan en la actualidad en Sudáfrica, procesando PGM, poseen una profundidad entre 500 metros y 2 kilómetros.

Los PGM tienen como propiedad fundamental su ductilidad, resistencia a la oxidación y corrosión a las altas temperaturas.

Su principal uso es como catalizadores debido a su estabilidad química, pero no se limitan a este papel. De acuerdo con la International Platinum Group Metals Association (IPA), una cuarta parte de todos los bienes fabricados o bien contienen un PGM o tienen un PGM que juega un papel clave en su producción (IPA, 2015).

Algunos ejemplos de aplicaciones de uso final incluyen: en catalizadores para la industria del petróleo (paladio y platino), en marcapasos y otros implantes médicos (iridio y platino), como una mancha para huellas dactilares y ADN (osmio), en la producción de ácido nítrico (rodio) y en

productos químicos, como líquidos de limpieza, adhesivos y pinturas (rutenio) (CRM, 2016). Actualmente Chile no cuenta con ningún proyecto de extracción de elementos de grupo platino.

TIERRAS RARAS LIVIANAS																	
Elemento	Precio [USD/kg] (Price Metal, 2017)	Principal Uso															
Escandio	4000	Aleaciones metálicas para industria aeroespacial, para equipos deportivos y equipos de defensa.															
Yttrio	85	Cerámicas, aleaciones metálicas, láseres, comunicación por microondas para industria de satélites, pantallas, sensores de temperatura.															
Lantano	2,4	Baterías, catalizadores en refinación de petróleo.															
Cerio	2,7	Catalizadores, aleaciones de metales, pulido (de vidrio, espejos, placas frontales de televisión, cristales ópticos, microprocesadores de silicio, lentes), baterías.															
Praseodimio	7	Pigmento, reflectores.															
Neodimio	85	Imanes de alta potencia para equipos tecnológicos, motores de vehículos híbridos, generadores de turbinas eólicas.															
Prometio	32	Fuente de radiación beta, catalizadores.															
Samario	7	Imanes de alta temperatura, barras de control de reactores.															
Europio	150	LCDs, luces fluorescentes, aditivos para el vidrio.															
Gadolinio	16	Resonancia magnética.															
Terbio	480	Baterías, fósforos para tubos de TV y lámparas fluorescentes.															
Disprosio	350	Imanes de alta potencia, láseres, baterías.															
Holmio	169	Compuesto principal de los imanes con mayor potencia en la actualidad.															
Erbio	1,1																
Tulio	-	Imanes de alta potencia.															
Yterbio	-	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones metálicas.															
Lutecio	-	Rayos X.															

El grupo de los elementos de tierras raras (REE) está conformado por 17 elementos químicos de la tabla periódica, 15 de ellos pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio).

La producción global de tierras raras el año 2015 fue de 124.000 toneladas, de las cuales un 85% se produjo en China. Este país tiene una marcada ventaja en el mercado gracias a su contexto

geológico, ya que cuenta con los mayores yacimientos conocidos del mundo y, también, gracias a su fuerte desarrollo de tecnologías de procesamiento.

El Proyecto Minero El Cabrito ubicado en la comuna de Penco, Cordillera de la Costa, VIII Región, es la iniciativa de tierras raras más avanzada en Chile, corresponde a un yacimiento de arcillas adsorbentes que además cuenta con una planta piloto de procesamiento. Actualmente se encuentra detenido. También existen tres prospectos mineros de ENAMI y CChEN: Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz en la Cordillera de la Costa, con yacimientos de tierras raras.

Ya habiendo descrito los elementos críticos, es relevante establecer la potencial demanda de estos en el contexto global. Desde esta perspectiva vale destacar y comprender el rol que juega la República Popular de China con relación a los CRM.

En la Tabla 16, se presenta un resumen de los diferentes elementos estratégicos y los principales proveedores, de esta se aprecia que China proporciona más del 60% de todos estos elementos al mundo.

A pesar de lo recién mencionado, se espera que, en 10 años, el escenario mundial de la demanda de CRM cambie e impacte la posición de China. En otras palabras, debido a su crecimiento económico y tecnológico, pase de ser de un exportador neto a un importador neto de muchos elementos como antimonio, galio y germanio.

Tabla 16: Principales países productores de CRM (EU, 2014)

Mineral Estratégico	Principal proveedor (>20%)	Mineral Estratégico	Principal proveedor (>20%)
Antimonio	China (87%)	Magnesita	China (69%)
Berilio	USA (90%)	Magnesio	China (86%)
Boratos	Turquía (38%)	Grafito	China (69%)
Cromo	Sudáfrica (43%) Kazajistán (20%)	Niobio	Brasil (92%)
Cobalto	República del Congo (56%)	Grupo platino	Sudáfrica (61%)
Carbón de coque	China (51%)	Indio	China (58%)
Fluorita	China (56%)	Tierras raras pesadas	China (99%)
Galio	China (69%)	Tierras raras Livianas	China (87%)
Germanio	China (59%)	Wolframio	China (85%)

El crecimiento de la demanda de los CRM es una variable en la criticidad, es fundamental comprender este fenómeno, en la Tabla 17, se muestra la clasificación de crecimiento de demanda dependiendo del elemento, observándose el Niobio, galio y tierras raras pesadas como los elementos más críticos en términos de demanda, con una proyección que supera el 8% anual.

Tabla 17: Pronostico del crecimiento medio de la demanda hasta 2020 para materias primas críticas (% por año) (Roskill, 2013)

Muy alto crecimiento de demanda (>8%)	Alto crecimiento de demanda (4.5%-8%)	Moderado crecimiento de demanda (3%-4.5%)	Normal crecimiento de demanda (<3%)
Niobio	Cobalto	Wolframio	Magnesita
Galio	Tierras Raras livianas	Cromo	Silicio Metal
Tierras raras pesadas	Indio	Germanio	Antimonio
	Magnesio	Metales del grupo Platino	Fluorita
		Boratos	Berilio

El aumento de la demanda de los CRM se debe principalmente a artículos de alta tecnología, en la Tabla 18 se ejemplifican algunas proyecciones destinadas a la demanda de tecnologías emergentes, mostrándose que, en menos de tres décadas, la demanda por estos usos aumentaría en más de 2000%

Tabla 18: Proyección de la demanda destinada a tecnologías emergentes (EU, 2014)

CRM	Producción 2006 (t)	Demanda destinada a tecnologías emergentes en 2006 (t)	Demanda destinada a tecnologías emergentes en 2030 (t)
Galio	152	28	603
Indio	582	234	1911
Germanio	100	28	220
Neodimio	16.800	4.000	27.900
Platino	255	Muy baja	345
Cobalto	62.279	12.820	26.860
Paladio	267	23	77
Rutenio	29	0	1
Niobio	44.531	288	1.410
Antimonio	172.223	28	71
Cromo	19.825.713	11.250	41.900

A partir de esta información se plantea la interrogante de como cubrir esta demanda, debido a esto, los esfuerzos de innovación y desarrollo tecnológico se han intensificado respecto a este tema. El trabajo de tesis plantea como hipótesis, la factibilidad de una planta capaz de reprocesar relaves y que a su vez aproveche este mercado emergente de minerales estratégicos, presentando una solución robusta a una situación geopolítica actual.

3. POLÍTICAS PÚBLICAS DEL ESTADO DE CHILE RESPECTO A LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ EXTRACTIVA Y TRATAMIENTO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

La minería en Chile es el sector productivo con mayor contribución a el producto interno bruto, representando un 8% en 2017 y con cifras de hasta un 16% en el año 2010 (Consejo Minero, 2017), con respecto a la contribución de la minería en las exportaciones, esta representa el 55% de ellas en 2017 (Consejo Minero, 2017) debido a esto, es innegable la fundamental contribución de la minería a la economía del país. Desde hace mucho la minería es un pilar del progreso nacional. Según un estudio reciente, si no se hubiesen aumentado las exportaciones mineras como ocurrió desde 1990 en adelante –y se hubiese mantenido la misma trayectoria institucional y productiva del período 1960-90- , el ingreso nacional actual sería un 45% menor del que efectivamente es (Programa Alta Ley, 2015).

En base a estos datos, el gobierno de Chile a cargo de la presidenta Michelle Bachelet crea el año 2014 las directrices de un plan estratégico llamado “*Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile*” desarrollado por la Comisión Minería y Desarrollo de Chile junto con el Consejo Nacional de Innovación y Competitividad. A pesar de que este programa se presenta como una manera de aumentar la productividad de la minería y mejorar la posición de esta debido a su rol de sustento económico de la nación, se sigue manteniendo la atención en el cobre, sin hacer mayores alusiones a cómo avanzar y destrabar el modelo económico actual, en uno más sostenible, diversificado y con un riesgo menor al actual, donde se depende principalmente de una materia prima y todo lo que le rodea.

En este plan, se destaca la responsabilidad de trabajar hoy los desafíos para la minería que se busca en el futuro, destacando la necesidad de aumentar la inversión minera y a su vez el fortalecimiento de confianza pública en el quehacer minero. Para cumplir con este objetivo, se plantea que es clave avanzar en la sustentabilidad ambiental e inclusión de los pueblos mineros y comunidades indígenas en donde se despliega la labor minera. Además, un desafío del sector es el lograr incrementar la productividad y desarrollar plataformas para el crecimiento de nuevas industrias y servicios ligadas de manera directa e indirecta a la minería.

Según la opinión de la autora de esta tesis, a pesar de que existen intenciones claras de lo que se desea para futuros proyectos mineros, existe muy poca claridad en un plan de trabajo robusto, sin especificar, proyectos de ley ni metas claras a corto plazo que contribuyan a solucionar los desafíos que plantea la minería mundial y nacional. Este plan se plantea como una política de gobierno y no de estado, por lo que la continuidad de este queda en una posición vulnerable dependiendo de la situación política de la nación.

Acorde al plan estratégico planteado, se genera el trabajo de tesis, apuntando a uno de los

objetivos deseados del programa; diversificar la matriz extractiva chilena. La principal razón de plantear la diversificación como eje principal, es para evitar la situación histórica conocida como “El fantasma del salitre”.

Como consecuencia a este plan estratégico, nace el Programa Nacional de Minería Alta Ley, es una iniciativa de CORFO y del Ministerio de Minería, que se desarrolla dentro de los Programas Estratégicos Nacionales de CORFO. Su principal objetivo es fortalecer la productividad, competitividad e innovación en la industria minera nacional y sus proveedores, con el fin de impulsar el desarrollo del país.

En base a esto CORFO llama a dos ejes principales (Programa Alta Ley, 2016)

- Desarrollar sistemas de monitoreo de estabilidad física y química de depósitos de relaves.
- Identificar y cuantificar la existencia de minerales de alto valor contenidos en los relaves y promover la adopción, adaptación y/o desarrollo de tecnologías de procesamiento que permitan capturar valor y contribuir a transformar los depósitos de relaves “de un pasivo a un activo”.

Como consecuencia al llamado de CORFO, cabe destacar que estos dos ejes principales son respuesta a la ineficiencia del proceso inicial, logrando encontrar en relaves mineros leyes de 1% de cobre. A pesar de que se busca desarrollar sistemas de monitoreo de estabilidad física, no se especifica acciones concretas sobre el depósito de relaves.

Como respuesta a estos desafíos nacionales, se plantea un proyecto de tesis que busca combinar distintas aristas económicas y técnicas de índole nacional y mundial, para lograr una solución robusta a un actual problema que busca ser transformado en un modelo de negocios que contribuya al crecimiento de la economía nacional.

4. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

Actualmente Chile posee 15,5 billones de metros cúbicos de relaves autorizados a depositar (i.e., relaves a generar) presentando un riesgo al medio ambiente y un problema para la autorización ambiental de futuros proyectos mineros. Debido a esto, se asignan organismos estatales encargados de liderar este desafío, sin embargo, en la actualidad, el 96,5% de los relaves en Chile, se encuentran en embalses y tranques, sin medidas que aseguren su estabilidad geomecánica y que puedan presentarse como futuras soluciones para que se recuperen esos suelos intervenidos en un cierre de faenas. Una medida concreta y eficiente a implementar, es la creación de nuevos relaves que se depositen de manera no segregada, asegurando una depositación segura y con la posibilidad de futuros planes de recuperación al cierre de las faenas. Sería una solución concreta y totalmente disruptiva a nivel mundial el poder plantear un modelo de minería sin pasivos ambientales, generando investigación para poder extraer valor al depósito y además crear subproductos de este.

Los CRM son descritos en este capítulo, estos elementos son en su mayoría elementos menores, cuya producción es baja y esta principalmente concentrada en China, sobre un 60%, dejando expuesto a la variabilidad del desarrollo del mercado chino a los productores de tecnologías que no están en China.

Se presenta el desafío de que ciertos CRM, tales como el Niobio, Galio y algunas tierras raras, tienen un crecimiento en su demanda superior al 8% anual, debido a esto, se proyecta que la República Popular China, en diez años más, pase de ser un exportador neto de algunos CRM, a un importador neto, presentándose esta situación como una oportunidad de generar oferta de estos elementos.

Con estos antecedentes, queda en evidencia la relevancia de la hipótesis planteada para esta memoria, ya que aborda la problemática de acceder a estos elementos estratégicos, a través lugares y fuentes diferentes, en específico el preprocesamiento de desechos mineros (relaves), permite separar elementos de valor residual, tales como cobre y molibdeno, y CRM. Además, esta reprocesamiento genera la oportunidad de que los nuevos desechos generados, sean dispuestos de una forma amigable con el ambiente.

III. CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO DE UN RELAVE NO ACTIVO – TRANQUE COEMIN

Coemin es un tranque de relaves ubicado en Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile. Este tranque se utilizará como caso de estudio para llevar a cabo la evaluación de la hipótesis propuesta en este trabajo de memoria.

Un informe técnico generado por CORFO (2013) sobre la caracterización química de diferentes tranques de relaves, que incluyen Coemin, será utilizado como fuente primaria de información, para fundamentar este estudio.

Este documento permite realizar un procedimiento preliminar, de selección de elementos estratégicos, acorde a la información descrita en términos del análisis ICP-MS disponible.

Con los datos presentados, se realizará un análisis mineralógico de los elementos seleccionados para tener una base técnica que sustente el diseño de procesos de la planta de extracción.

En la sección siguiente se proporciona una descripción detallada del tranque de relaves Coemin.

1. DESCRIPCIÓN TRANQUE DE RELAVE



Figura 1: Ubicación geográfica del tranque Coemin

El tranque de relaves Coemin a estudiar, se ubica en la ciudad de Tierra Amarilla, tercera región de Atacama, Chile (ver Figura 1).

Este tranque se encuentra actualmente cerrado y fue destinado para depositar los relaves de una faena de procesamiento de minerales sulfurados dedicados a concentrar cobre, cuyas operaciones comenzaron en el año 1970. El tranque posee 30 millones de toneladas de relaves, a pesar de estar cerrado, la faena sigue funcionando y utilizando un segundo tranque que actualmente posee 5 millones de toneladas de relaves depositados.

La Planta está a cargo de la empresa Coemin con una capacidad de procesamiento de 5.000 t/d. Actualmente se procesan cerca de 3.000 t/d. Existen planes para aumentar la capacidad a 8.000 t/d. Además de los planes de aumentar la

capacidad de procesamiento de la planta, se encuentran desarrollando un proyecto para

solicitar la construcción de un tercer tranque de relaves con capacidad de 200 millones de toneladas depositadas.

Cabe destacar que este relave está ubicado en una zona saturada de relaves mineros, como es la región de atacama, la cual posee 368 depósitos de relaves, representado un 53% del total nacional. La Figura 2, ilustra la cantidad de depósitos mineros de la zona, los cuales están ubicados en las cercanías de los centros poblados y causes de los principales ríos de la región.

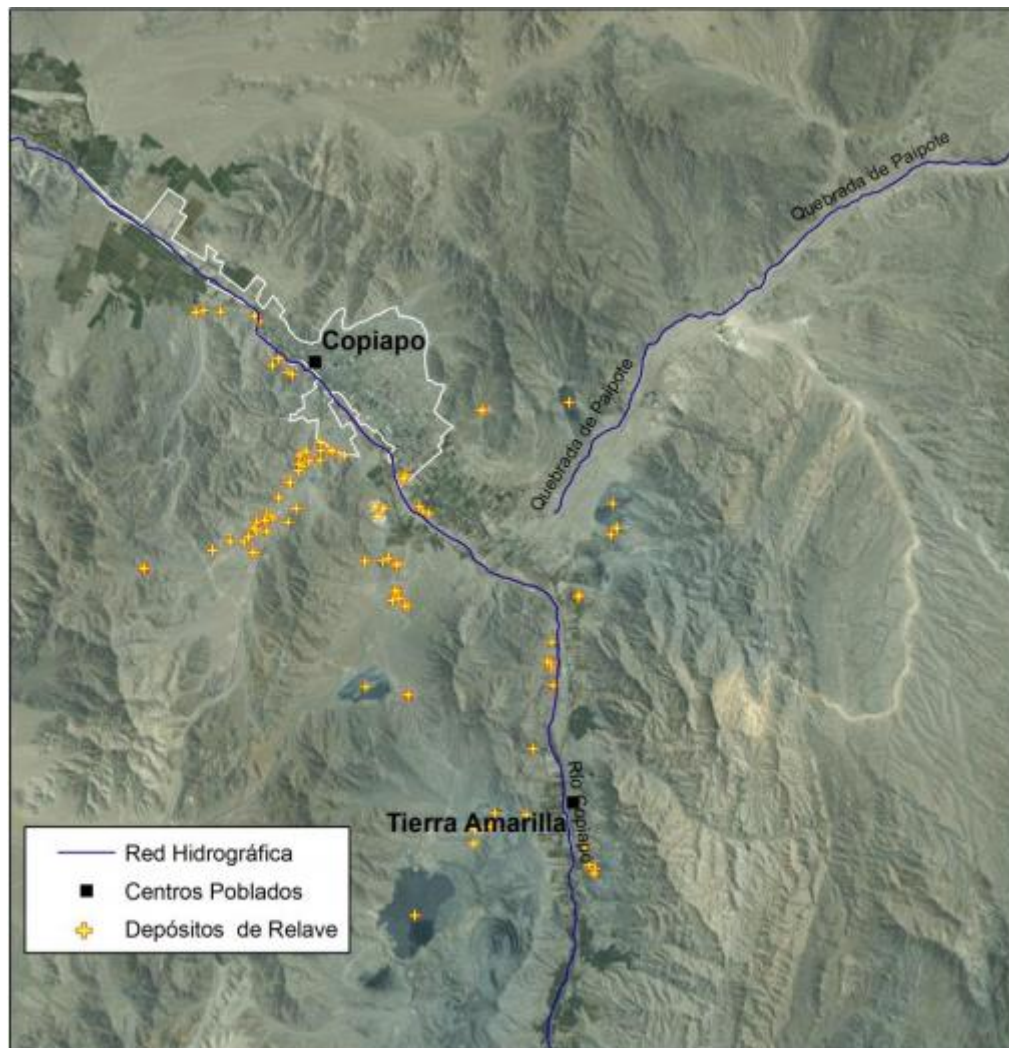


Figura 2: Relaves depositados en la provincia de Copiapó (Hernández, 2016)

En este contexto, la situación alcanza un punto de criticidad, en marzo del año 2015, cuando los pobladores de la región fueron testigos de una de las mayores catástrofes naturales vividas, un alud, que alcanzó flujos de 1000 metros cúbicos por segundo en la cuenca del río Salado, dejando

ciudades como Chañaral bajo 4.5 metros de lodo, cobrando la vida de 31 personas y dejando 49 desaparecidas ²

Debido a esto, fue altamente cuestionada por la comunidad nacional e internacional la situación de los pasivos ambientales mineros en Chile. Durante toda la catástrofe se presentó un miedo generalizado en la población por posibles colapsos de tranques de relaves, tanto durante el evento, como posterior a este. Sernageomin clasificó los nueve tranques de relaves que presentaban mayor peligro durante el paso de este sistema frontal, en consideración a su tamaño, cercanía a centros poblados y cursos de aguas principales. El tranque Coemin se presentó como el cuarto con mayor peligrosidad, sin embargo, según reportes oficiales, este no presentó daño estructural. Esta información, entrega relevancia al caso estudio, ya que es inminente la necesidad de generar soluciones sostenibles a los problemas descritos.

2. SELECCIÓN CASO ESTUDIO

Es importante mencionar, que se seleccionó el relave Coemin entre 11 tranques que poseían análisis químicos, los nombres de estos se pueden observar en la Tabla 19, además una descripción del mineral explotado en la faena, su tonelaje y estado actual.

Tabla 19: Relaves que cuentan con análisis químicos (SERNAGEOMIN, 2016)

Nombre	Recurso	Toneladas	Estado
Planta Bellavista	ORO-COBRE	136,024	ACTIVO
Planta Delta	COBRE	10,000,000	ACTIVO
Planta Ovalle	COBRE-ORO	180,000	NO ACTIVO
Planta Vallenar	COBRE	3,500,000	ACTIVO
Planta las Bombas	ORO-COBRE	34,560	ABANDONADO
Planta Taltal	ORO-COBRE	62,700	ABANDONADO
Planta Las Luces	-	-	-
Planta Matta	COBRE	25,000,000	ACTIVO
Planta Minera Carola	COBRE	30,000,000	NO ACTIVO
Planta Chañaral	COBRE-ORO	450,000	NO ACTIVO
Planta El Salado	COBRE-ORO	450,000	NO ACTIVO

Para llevar a cabo esta selección, el primer filtro fue el tamaño del relave, en base a esto se escogen los dos relaves de mayor tamaño, el relave de la planta Matta con 25 millones de toneladas y el relave de la planta Carola de 30 millones de toneladas. Se escoge la decisión del tranque a estudiar, en base a su estado actual, para el caso del relave Coemin, de la planta

² <http://www.emol.com/noticias/nacional/2015/03/31/710748/tragedia-en-el-norte>

Minera Carola, este se encuentra cerrado, mientras el tranque Matta, está aún en operación. Debido a este criterio el tranque seleccionado, es el tranque Coemin, de la planta Minera Carola.

3. ANALISIS DE MUESTREO

El análisis de químico de muestreo de relaves se realiza mediante la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo con láser acoplado³ (i.e., LA ICP-MS). Las ventajas principales de esta técnica radican en la alta precisión, bajos límites de detección y bajo coste económico, desde los últimos años la utilización del láser acoplado al ICP-MS, permite el análisis de elementos trazas y tierras raras en minerales, fósiles, metales, semiconductores, etc., en partículas de hasta 50 μm . La técnica de ICP-MS combina dos propiedades analíticas que la convierten en un potente instrumento en el campo del análisis de trazas multi-elementales, además la técnica obtiene una matriz prácticamente libre de interferencias debido a la eficiencia de ionización del plasma de Ar.

El relave fue muestreado en tres lugares predeterminados, con perforaciones a una profundidad de 2 metros. El primer punto de perforación se ubicó cerca de la antigua descarga y otro en una posición distante a la descarga. Adicionalmente, se realizó un muestreo en el centro del tranque de relaves. Este punto de muestra se encuentra en el medio de una línea entre el punto de descarga y el punto de muestreo a distancia máxima.

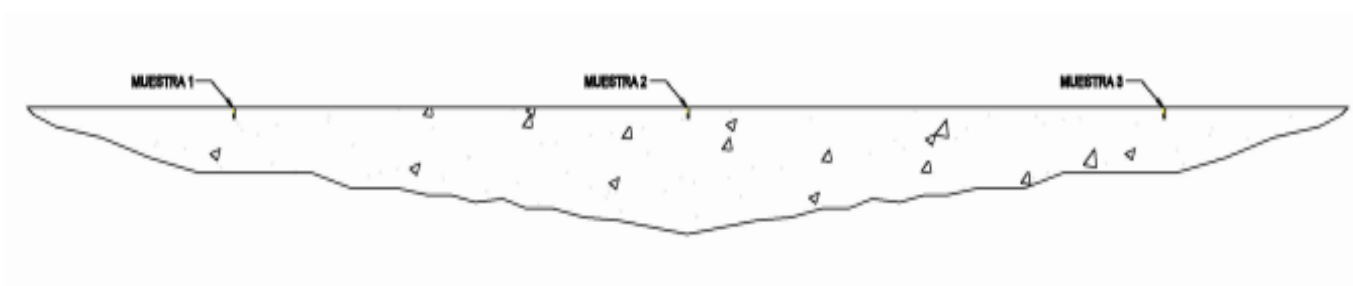


Figura 3: Ilustración puntos de muestreo

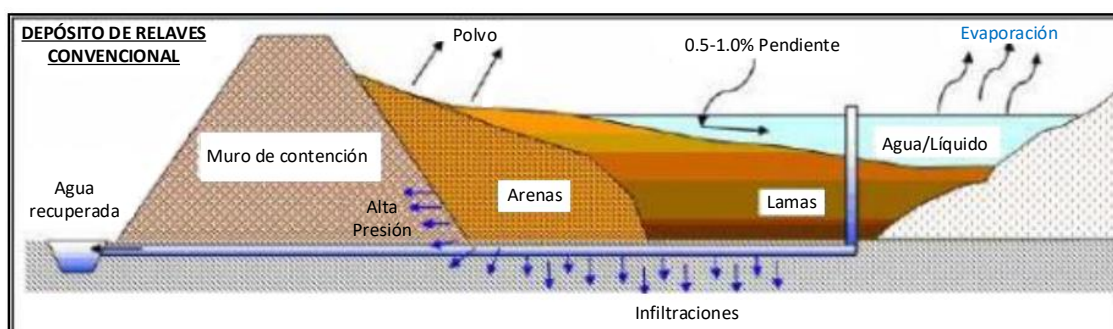
En base al sistema de muestreo, se genera uno de los mayores puntos de discusión y análisis en torno a este trabajo de memoria, debido a que como se muestra en la figura X, el tranque de relaves Coemin, posee un volumen de 22 millones de metros cúbicos, considerando una altura promedio de 20 metros, un largo de 1,7 kilómetros y un ancho de 650 metros, el muestreo en tres puntos a una profundidad de 2 metros, es poco representativo.

El organismo encargado de estos análisis, indica que las tres muestras previamente descritas son suficientes debido a que; *“Con esto se pretende obtener muestras con diferentes*

³ <https://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/intro.html>

granulometrías, ya que se supone una distribución granulométrica natural, desde la descarga hacia lugares más distantes de este punto.” (CORFO, 2013). Sin embargo, esta afirmación, no es precisa.

El sistema para depositar relaves en este tranque, fue sub -aéreo, es decir, con un tipo de descarga que forma corrientes de baja velocidad, presentando un flujo laminar, que a su vez posee poca profundidad, lo que permite que el relave fluya (Conejaria, 2016) y se presente el fenómeno de segregación de partículas y estratificación de suelo en el tranque, este fenómeno se ilustra en la Figura 4.



Fuente: Valdebenito, 2008.

Figura 4: Depósito de relaves convencional

Por consiguiente, debido al tipo de depósito del relave, no es posible predecir una distribución de tamaño de partícula en el tranque, bajo este mismo supuesto, el informe reporta un P80 de 200 micrones, medición que no se puede afirmar como representativa, debido al problema de muestreo.

Un tranque de relaves se considera un depósito de mineral de baja ley de origen antropogénico, que al presentar un sistema de depositación segregado, crea un recurso minero heterogéneo, en tres ámbitos fundamentales; distribución del tamaño de partículas, liberación y ley del mineral a explotar. Debido a esto, el análisis de muestreo se presenta como un gran desafío para un estudio concreto de la factibilidad de explotación de relaves mineros.

Con el propósito de llevar un entendimiento total al embalse de relaves, se debe realizar un muestreo representativo al depósito, considerando dos aspectos fundamentales (Gy, 1979):

- Cantidad de muestras, acordes al volumen del tranque de relaves.
- Cantidad de masa a muestrear, concordante a las distintas distribuciones de tamaño de partículas y a la ley del elemento a extraer.

El segundo punto cobra un especial interés en este tipo de depósitos, debido a que, en los análisis presentados, se muestra como principal elemento de interés el cobre, sin embargo, el tamaño de la muestra debe cambiar al tratarse de otro elemento, por ejemplo, la diferencia de partes por millón si comparamos el cobre y el germanio de esta muestra son un orden de magnitud de 100 veces de diferencia, por lo que es importante realizar el muestreo con las cantidades apropiadas a estudiar.

4. SISTEMA DE MUESTREO PROPUESTO

Para el caso de este tranque de relaves, una opción viable es realizar una mayor cantidad de puntos de muestreo georreferenciando el área completa del tranque, para así lograr crear una matriz en torno a la superficie. Para el caso de la profundidad del relave, es importante que todas las perforaciones logren llegar lo más próximo a la profundidad máxima de este, tomando muestras del tranque a diferentes alturas. Para ejemplificar esto, en el caso del tranque de relaves Coemin, si su altura máxima fuera de 30 metros sería importante realizar muestras a una altura constante, como por ejemplo cada 3 metros, para así lograr crear esta matriz tanto en altura como en superficie.

Para lograr tener un entendimiento completo del tranque de relaves y poder realizar un diseño de procesos y operación adecuado, es recomendable crear un modelo geo-estadístico que contemple por lo menos las tres variables más sensibles del sistema; distribución de tamaño de partículas, liberación y ley del mineral a extraer, este modelo se presenta en forma 3D, tomando el volumen completo del relave. En la Figura 5, se muestra un modelo de predicción para un caso estudio de un relave minero no activo, ubicado en Alterberg, Alemania, en la muestra se puede apreciar la distribución del contenido de caserita en el relave. Este mismo procedimiento se realizó para ver la liberación del mineral a interés, Figura 6, así como en la Figura 7, el tamaño medio de partículas, donde es interesante observar que para este caso, la zona roja representa un tamaño menor a 30 micrones, siendo este porcentaje no menor en el relave.

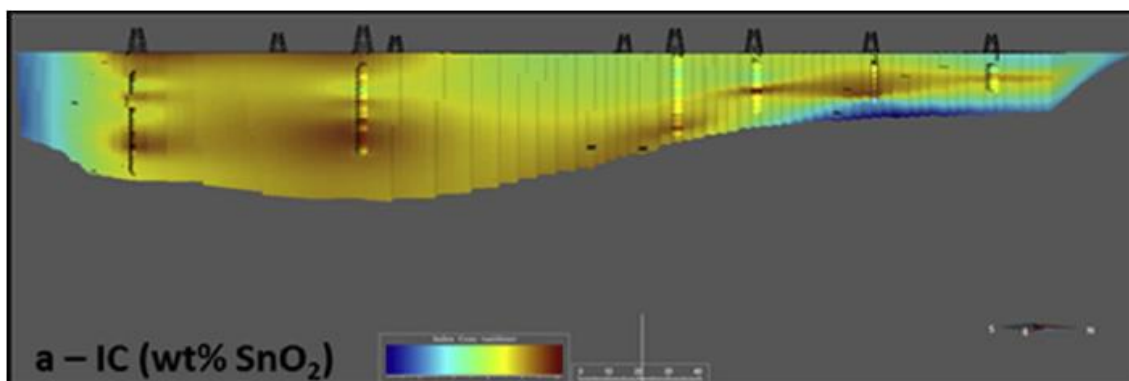


Figura 5: Modelamiento del porcentaje de caserita en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)

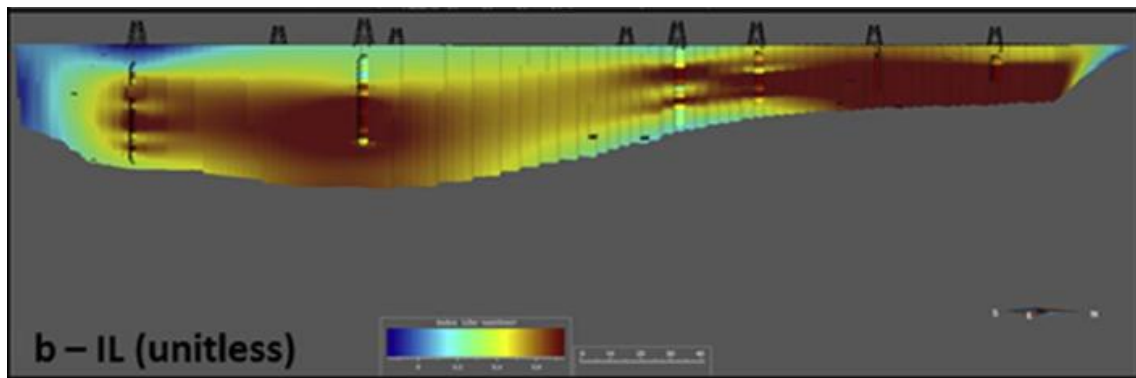


Figura 6: Análisis de liberación de caserita en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)

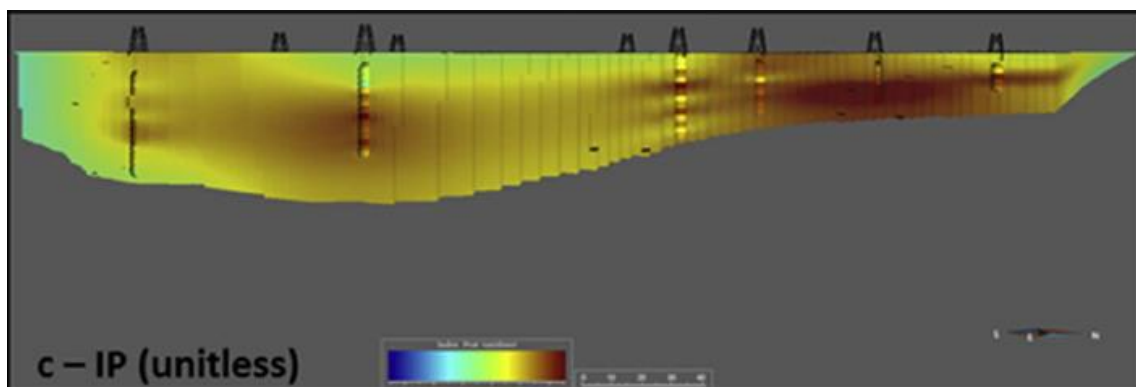


Figura 7: Tamaño medio de partícula en un depósito de relaves en Alemania (Büttner, 2017)

Considerando la heterogeneidad de las capas depositadas en estos tipos de tranques de relaves, no se puede considerar como totalmente representativa una muestra que caracteriza el 10% superior del tranque, sin embargo, los análisis se presentan como un punto de partida para un estudio de prefactibilidad.

5. ANÁLISIS QUÍMICOS TRANQUE COEMIN

Los resultados promedios de los análisis químicos de las muestras se pueden apreciar en la información que se presenta a continuación, en la Figura 8:

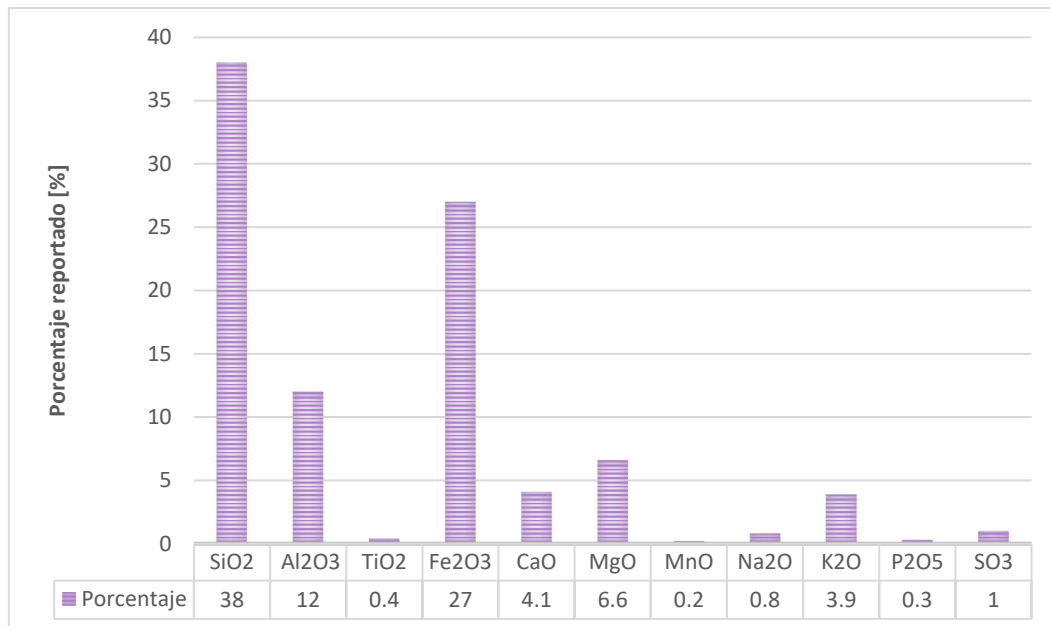


Figura 8: Resultado análisis compuestos químicos

Además del análisis de compuestos químicos, se realiza una medición de elementos, como se puede observar en la Figura 9, la ley de cobre asociada a estos relaves es de un 0,3%. Dentro de este análisis químico, es importante destacar al zinc y bario por su alta concentración. En el caso de los CRM en la Figura 9 se puede apreciar que hay una concentración de 157 ppm de cobalto, 9.6 ppm de Escandio y 4.5 ppm de Niobio. La ley de cabeza del cobalto es 0,2% (USGS, 2010) en contraste con la información presentada, que nos muestra un porcentaje cercano al 0.02% es decir, 10 veces menor, sin embargo, se debe tener en consideración que hay que analizar la liberación del elemento en el mineral y el tamaño de partícula, debido a que a pesar de que se debe pre-concentrar 10 veces el cobalto en nuestro caso estudio, por el hecho de tratarse de un depósito de relave, los costos de tronadura, chancado y molienda pueden equipararse con esta diferencia de ley de cabeza.

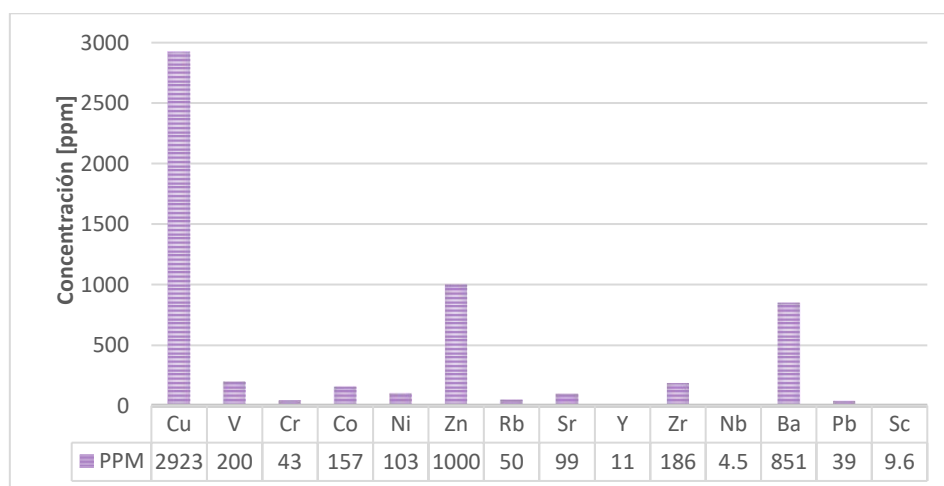


Figura 9: Elementos análisis relave Coemin

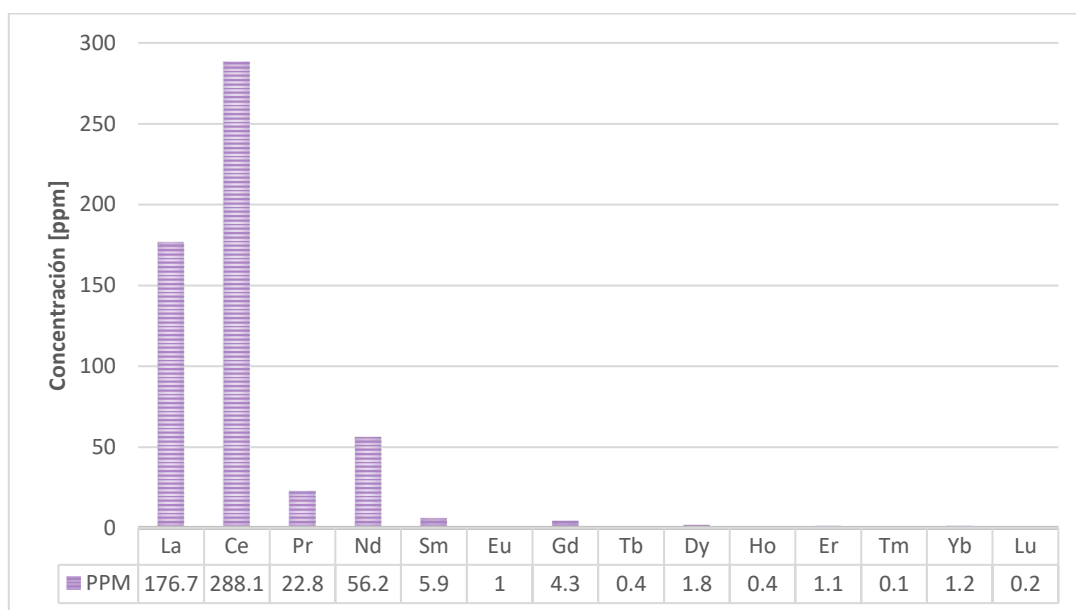


Figura 10: Tierras raras presentes en el relave Coemin

Como se muestra en la Figura 10, se realiza un análisis de tierras raras, presentándose una cantidad total de 560 partes por millón de estos elementos, las tierras raras livianas tienen mayor presencia en la caracterización, para el caso de las tierras raras pesadas, se observan cantidades bajas, que bordean 1 parte por millón. Las tierras raras se presentan en su totalidad como elementos de interés económico, con precios que varían desde los 2.5 USD/kg a 450 USD/kg. Las tierras raras se encuentran en el mineral de monzonita, para comprender los porcentajes de elemento en roca, se presenta la Tabla 20, que describe los porcentajes de cada mineral en los países que presentan las principales reservas de tierras raras en el mundo.

Tabla 20: Distribución de tipos de tierras raras, en las principales reservas del mundo (Geosciences Australia, 2013)

Mineral	CHINA [Peso %]	TAIWAN [Peso %]	AUSTRALIA [Peso %]	EE UU [Peso %]	INDIA [Peso %]
La_2O_3	23	21	23.2	17.4	22
CeO_2	42.7	47.9	46.3	43.7	46
Pr_6O_{11}	4.1	5.4	4.9	4.9	5.5
Nd_2O_3	17	18.7	18.3	17.1	20
Sm_2O_3	3	3.3	2.5	4.9	2.5
Eu_2O_3	<0.1	0.54	0.04	0.16	0.016
Gd_2O_3	2	1.6	1.7	6.5	1.2
Tb_4O_7	0.7	0.19	0.22	0.26	0.06
DY_2O_3	0.8	0.35	0.56	0.59	0.18
Ho_2O_3	0.12	0.03	0.08	0.11	0.02
Er_2O_3	<0.3	0.03	0.06	0.04	0.01

Tm₂O₃	TR	-	-	0.03	Tr
Yb₂O₃	0.24	0.07	0.04	0.21	Tr
Lu₂O₃	<0.14	-	-	0.03	Tr
Y₂O₃	2.4	0.19	1.57	3.18	0.45
ThO₂	4	0.41	6.4	-	9.5



Figura 11: Elementos radioactivos en la caracterización mineralógica

La Figura 11 muestra elementos radioactivos altamente diluidos, en el caso del Uranio, que presenta una ley de cabeza de 100 ppm (World Nuclear Association , 2017), el contenido en el caso estudio es aproximadamente un 1% de la ley de cabeza. Debido a la baja concentración no se presenta como un riesgo, pero están presentes y pensar en una explotación de ellos de manera económica, no se justifica

En la Figura 12, se muestra el resultado de la caracterización química para elementos menores, en este caso, se puede observar que dentro de la lista de CRM se presentan el Antimonio, Wolframio, Galio y Germanio. Se puede observar que el contenido de germanio en el relave es alto y muy cercano a las leyes de cabezas registradas, por ejemplo, en la República Democrática del Congo, se registran proyectos mineros que están comenzando su operación con una ley de germanio de 30 ppm (Mining Weekly, 2017). Para el caso del Galio, con una concentración de 64 ppm se presenta nuevamente una ley interesante a analizar, debido a que el Galio se asocia al mineral de bauxita con una concentración reportada entre 10 a 160 ppm (Mordberg 2001), la concentración promedio de Galio en minerales de bauxita es de 57 ppm (USGS, 2013). Para el Wolframio, la ley de cabeza es 0.05% es decir 500 ppm (Geoscience Australia, 2016), muy lejano a la concentración presentada en el relave.

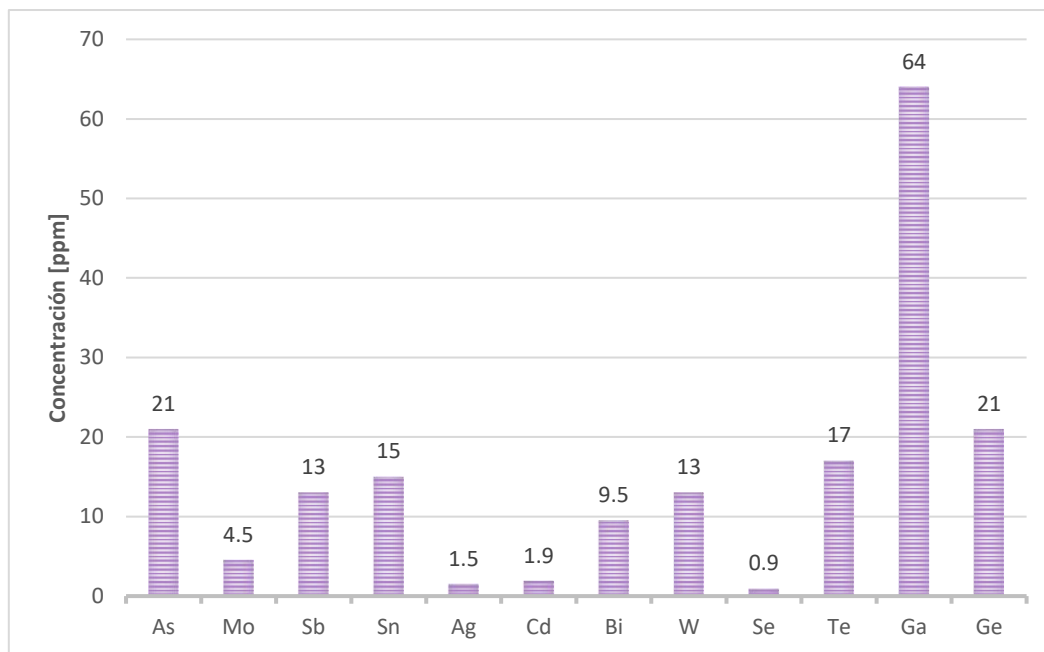


Figura 12: Elementos menores

Adicional a este análisis químico, se presentan cuatro pruebas experimentales que se resumen en la Tabla 21, la primera consta de una prueba de separación gravitacional, que aporta información del grado de separación dependiendo de las densidades de los diferentes componentes en el relave.

El análisis por difracción de rayos X muestra un alto contenido de magnetita. Posterior a esto se reporta un análisis de fluorescencia de rayos X con una resolución de 20 micras, aquí se corrobora la existencia de pirita y calcopirita. Finalmente se procede a realizar un análisis de liberación de minerales, en donde se corroboran los análisis anteriores y además se presenta que los minerales de ganga son principalmente aluminosilicatos, cuarzo y feldespato.

Tabla 21: Resumen análisis al tranque Coemin (CORFO, 2013)

Separación Gravitacional	El 23 % de la muestra total fueron separados como concentrados, reportando un 69% de cobre . Se reporta un concentrado muy puro que contiene una alta proporción de sulfuros. Dado que el contenido de cobre es relativamente bajo, se puede suponer que el concentrado se compone principalmente de pirita y no calcopirita
RDA (Análisis por Difracción de Rayos X)	En el material de la muestra del relave Coemin hay 18 % de la masa total como magnetita. En Minera Carola aparecen en calidad de minerales trazas: El cuarzo, la hematita y pirita
Análisis de fluorescencia de rayo X (μRFA)	La resolución del haz de rayos X es de aproximadamente 20 micras. Se corrobora la existencia de pirita, calcopirita, complementado los análisis con RDA. Se presenta la esfalerita como los minerales metálicos que predominan. Además, aluminosilicatos, feldespato, cuarzo y algunos óxidos de cobre y hierro.
MLA (Análisis de Liberación de Minerales)	El Concentrado de Minera Carola posee Un 70 % de pirita, siendo el mineral más abundante, seguido de un mineral de hierro (computacionalmente goetita, pero probablemente magnetita) con 6%, aluminosilicato (aproximadamente 5 %), la calcopirita (4 %), feldespato (3,7%) El 80 % de los granos medidos con la microsonda, tiene un tamaño de grano entre 40 y 200 micras. El tamaño medio de grano es de aproximadamente 85 micras

Tabla 22: Porcentajes de recuperación en la fracción magnética

Compuesto	Recuperación en fracción magnética (%)	Recuperación en fracción no magnética (%)
SiO ₂	29,80	70,20
Al ₂ O ₃	35,38	64,62
TiO ₂	35,81	64,19
Fe ₂ O ₃	69,84	30,19
Cu	29,52	70,48

La Tabla 22 aporta información importante para desarrollos de nuevos procesos, especialmente para la pre concentración del mineral. Los separadores magnéticos se presentan como una herramienta utilizada para concentrar mineral, para separar elementos de valor de la ganga no magnético, un ejemplo de esto es la separación de la magnetita del cuarzo o la separación casiterita de mineral de estaño, que a menudo se asocia con rastros de magnetita o wolframita que puede eliminarse mediante separadores magnéticos (Wills, 2006).

Los materiales se pueden clasificar en dos grandes grupos, de acuerdo con si son atraídos o repelidos por imanes. El primer grupo por clasificar son los minerales diamagnéticos, estos son repelidos por fuerzas magnéticas, debido a esto, estos elementos no pueden ser concentrados por separadores magnéticos. El caso contrario se produce en elementos paramagnéticos, que, si son atraídos y se pueden concentrar, ejemplos de minerales paramagnéticos son; Wolframita, Monzonita, Rutilio, Magnetita, entre otros.

Algunos elementos son paramagnéticos, como Ni, Co, Mn, Cr, Ce, Ti, O y el grupo platino, sin embargo, no pueden ser separados por vía magnética debido a que se encuentran ocluidos en matrices de minerales que principalmente son diamagnéticas.

Bajo este análisis se puede apreciar de la Tabla 22, que el Rutilo (TiO_2) se separa en un 35% en la fracción magnética y en un 65% en la no magnética. Esta información se puede interpretar con relación a la disposición del Rutilo en la estructura mineralógica del mineral, i.e., la cantidad de material que aparece en la fracción magnética, esta probablemente asociada a un material con alta susceptibilidad magnética, lo que es indicativo de una falta de liberación.

Los elementos en relaves mineros pueden encontrarse ocluidos en matrices minerales complejas, disminuyendo o anulando la posibilidad de recuperarlos en procesos mineros tradicionales.

Cabe destacar que los análisis realizados abarcan un amplio espectro de la mineralogía, liberación y tamaño de partícula, sin embargo, nuevamente se presenta la problemática de la poca representatividad del análisis, considerando un universo de muestra de 22 millones de metros cúbicos de minerales.

Los depósitos minerales antropogénicos, como es el caso del relave Coemin, presentan ventajas sustanciales, como son su exposición a la superficie, tonelaje bien definido y el tamaño de partícula de estos, debido a que es materia prima ya chancada y molida. Estas ventajas pueden disminuir el riesgo financiero que se presenta al invertir.

Considerando que la hipótesis de este trabajo de memoria busca recuperar elementos estratégicos para dar valor a un pasivo ambiental minero, es importante considerar que CRM se presentan en este tranque y como seleccionar los que sean rentables de explotar, para esto se diseña una matriz de decisión que busca crear una metodología de selección según los elementos disponibles en el tranque de relave a estudiar.

Para este caso estudio, la información que alimenta a esta matriz de decisión es la concentración de elementos estratégicos y otros de interés, como el cobre y molibdeno extraída de los análisis químicos del tranque de relaves.

Dos parámetros importantes que influyen en esta decisión, es si el elemento cuenta con una fuente alternativa y su riesgo de suministro. Esta información se obtiene de un ranking realizado por la Sociedad Real de Química o más conocida por su nombre en inglés, Royal Society of Chemistry ⁴. Estos parámetros aportan información crucial sobre la criticidad y la necesidad inminente de encontrar depósitos mineros.

⁴ <http://www.rsc.org/periodic-table/>

Los siguientes parámetros por considerar tienen que ver con variables económicas, para esto, se toman los precios promedios de cada elemento en el año 2016, en esta columna se puede apreciar que existen elementos de valores elevados, tales como el germanio y el escandio. Otra información que es importante tener en perspectiva para lograr evaluar este tipo de proyectos, es la demanda anual de cada elemento, es importante realizar una comparación que ilustre que commodities como el cobre, poseen una demanda anual de 15 millones de toneladas, de las cuales Chile exporta 6 millones. Un caso opuesto se puede observar en el escandio, un elemento de muy alto valor, que sin embargo en la actualidad tiene una demanda muy baja, de 15 toneladas anuales y que además no se transa en la bolsa de valores, a pesar de esto es importante mantener en perspectiva este tipo de elementos, ya que la tendencia global indica que el mercado de estos presenta un alza exponencial.

En la Tabla 23 se presenta la información de cada elemento presente en el relave, esos datos son claves para la construcción de la matriz. La información presentada se alimentó de los datos económicos, demanda y precio que fueron previamente descritos y referenciados.

La información presentada que respecta a la criticidad de cada elemento son indicadores evaluados anualmente por la Royal Society of Chemistry. Los datos utilizados para el cálculo de estos indicadores son proporcionados por el Servicio Geológico Británico (RSC, 2016).

El primer índice de criticidad es el riesgo de suministro integrado de 1 (muy bajo riesgo) a 10 (muy alto riesgo). Esto se calcula combinando los puntajes de abundancia cortical, distribución de reservas, concentración de producción, capacidad de sustitución, tasa de reciclaje y puntajes de estabilidad política. Cabe destacar que, al hablar de concentración de producción y distribución de las reservas, se refiere al porcentaje de un elemento extraído en el país productor principal y cuanto porcentaje de la reserva mundial este posee. Cuanto mayor sea el valor, mayor será el riesgo de suministro.

Para el indicador “Riesgo de suministro” se considera la estabilidad política, tanto del principal productor, como del país con la mayor cantidad de reservas de dicho mineral. Este es un rango percentil para la estabilidad política del país principal, derivado de los indicadores de gobernanza del Banco Mundial.

El índice de fuente alternativa se refiere al porcentaje del elemento que se recicla. Una tasa de reciclaje más alta puede reducir el riesgo de suministro.

En la Figura 13 se muestran las cuatro primeras columnas de la matriz y una descripción breve de cada uno de ellos.

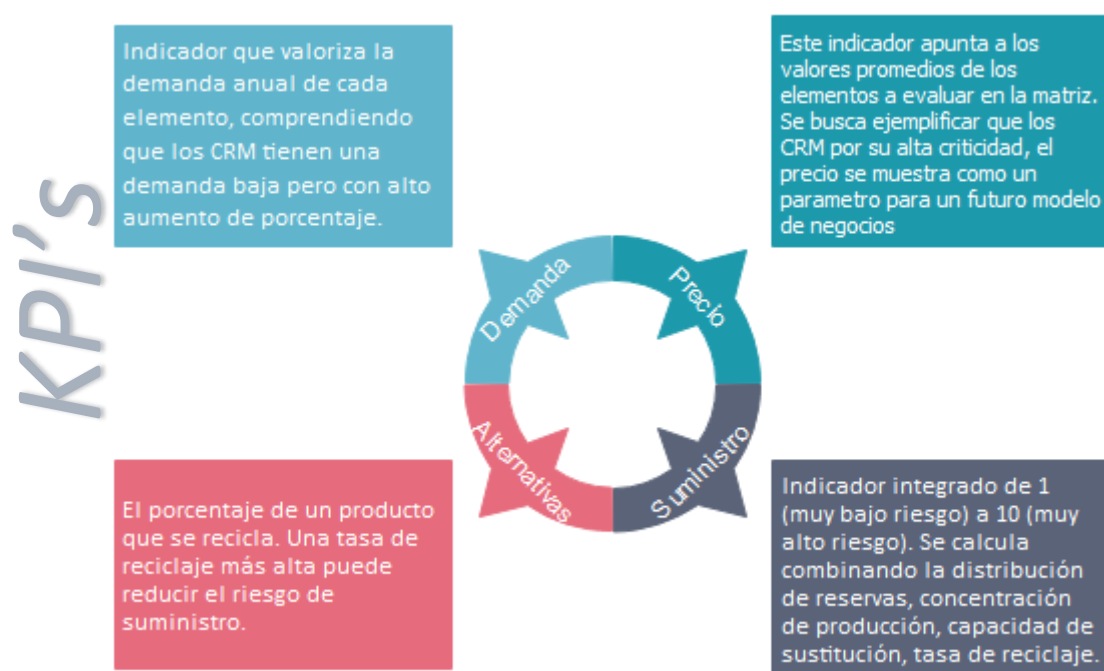


Figura 13: Componentes de la matriz de criticidad. Indicadores claves de desempeño para el análisis de criticidad (Key Performance Indicators, KPI).

Complementario a estos 4 puntos relevantes en la elección, se presenta un análisis preliminar de la ganancia en una tonelada de cada elemento, en el caso de esta matriz, se utiliza una eficiencia de 60%.

Tabla 23: Datos para elaborar la Matriz del relave Coemin

Elemento	Símbolo	Concentración [ppm]	Fuente alternativa [%]	Precio [USD/kg]	Demanda Anual [t]	Riesgo de suministro	Eficiencia	Ganancia por tonelada [USD/t]
Cobre	Cu	2922	>30	6	15,000,000	4.3	80%	14
Molibdeno	Mo	4.5	>30	16	227,000	8.6	80%	0.1
Cobalto	Co	157	>30	59.7	123,000	7.6	70%	6.6
Niobio	Nb	4.5	>30	42	64,000	7.6	55%	0.1
Antimonio	Sb	12.7	<10	9.26	158,000	9	55%	0.1
Galio	Ga	64.1	<10	130	470	7.6	55%	4.6
Germanio	Ge	20.9	<10	1130	160,000	8.1	55%	13
Escandio	Sc	9.6	<10	4000	15	9.5	40%	15
Lantano	La	176.7	<10	2.4	9,000	9.5	55%	0.2

Cerio	Ce	288.1	<10	2.7	9,000	9.5	55%	0.4
Praseodimio	Pr	22.8	<10	85	9,000	9.5	55%	1.1
Neodimio	Nd	56.2	<10	42	9,000	9.5	55%	1.3
Samarium	Sm	5.9	<10	7	9,000	9.5	55%	0.0
Europio	Eu	1	<10	150	9,000	9.5	55%	0.1
Gadolinio	Gd	4.3	<10	15.9	9,000	9.5	55%	0.0
Terbio	Tb	0.4	<10	480	9,000	9.5	55%	0.1
Disproso	Dy	1.8	<10	350	9,000	9.5	55%	0.3
Holmio	Ho	0.4	<10	169	9,000	9.5	55%	0.0
Erbio	Er	1.1	<10	95	9,000	9.5	55%	0.1
Wolframio	W	12.9	10 a 30	30.9	89,400	9.5	55%	0.2

Se puede apreciar que los minerales que presentan mejores valores de ganancia por tonelada son el Escandio, Germanio, Galio, Cobalto y Cobre, en el caso estudio presentado.

Para ejemplificar cómo se calcula la ganancia por tonelada, tomaremos como ejemplo el caso del Wolframio, en la

Ecuación 1, se muestra el cálculo de esta variable:

$$\frac{\text{Concentración}}{1000} \cdot \text{Precio} \cdot \text{Eficiencia} = \text{Ganancia}$$

$$\frac{12,9}{1000} \cdot 30,9 \cdot 0,6 = 0,2 \left[\frac{\text{USD}}{t} \right]$$

Ecuación 1

Considerando los valores de concentración entregados por los análisis químicos, en este caso 12,9 ppm, un precio promedio de 30,9 [USD/kg] y una eficiencia de 60% se obtiene el valor de que, para cada tonelada procesada, preliminarmente se puede calcular un ingreso de 0,2 dólares. Este cálculo representa una manera sencilla de poder mostrar los ingresos considerando los parámetros de concentración y precios, es decir, busca cuantificar datos de mercado y concentración.

La Tabla 23 no cuantifica en su totalidad los parámetros mencionados, debido a esto, se decide darles valores de 1 a 4 para así lograr considerar los aspectos económicos, de criticidad y concentración propios del caso estudio.

Tabla 24: Valores asignados a cada parámetro de decisión

	Valor asignado	0.25	0.5	0.75	1
KPI's	Precio [USD]	0 – 9,99	10– 99,9	100–999,9	>1000
	Riesgo de suministro	0 a 3	3 a 6	6 a 8.5	8.5 a 10
	Fuente Alternativa	>30	10 a 30	<10	-
	Demanda [t]	0 – 500	500 - 25000	25000 - 100000	100.000 -
	Ganancia por tonelada [USD/t]	0 – 0,49	0,5 – 0,99	1 – 4,99	> 5

Los parámetros descritos en la Tabla 24 representan una valorización de diferentes rangos de los indicadores previamente descritos, de esta forma se busca unificar criterios y presentar la información de manera más simple, logrando crear un análisis claro de pre factibilidad, considerando factores que no solo incluyen los parámetros económicos, sino que también los de criticidad, que influyen la creación de negocios desde una mirada más estratégica y buscando diversificar la matriz de extracción.

A partir de estos criterios, se construye la matriz de decisión de elementos, herramienta que busca asignar puntuaciones a cinco parámetros claves en las decisiones de como poder valorizar un pasivo ambiental minero.

Cada indicador recibe un valor según los rangos en donde estos se encuentren, a partir de esto los cinco valores se suman para cada elemento, entregando un resultado que busca apoyar la decisión de que elemento extraer.

Tabla 25: Matriz de decisión del relave Coemin

	FACTORES					
Elemento	<i>Fuente alternativa</i>	<i>Precio</i>	<i>Demanda</i>	<i>Riesgo de suministro</i>	<i>Ganancia</i>	$\prod$ (FACTORES)
Cobre	0.25	0.25	1	0.5	1	0.03
Molibdeno	0.25	0.5	1	0.75	0.25	0.02
Cobalto	0.25	0.25	1	0.75	1	0.09
Niobio	0.25	0.25	0.25	0.75	0.25	0.01
Antimonio	0.75	0.25	1	1	0.25	0.05
Galio	0.75	0.75	0.25	0.75	1	0.11

Germanio	0.75	1	1	0.75	1	0.56
Escandio	0.75	1	0.25	1	1	0.19
Lantano	0.75	0.25	0.25	1	0.25	0.01
Cerio	0.75	0.25	0.25	1	0.25	0.01
Praseodimio	0.75	0.25	0.25	1	0.75	0.07
Neodimio	0.75	0.25	0.25	1	0.75	0.07
Samario	0.75	0.25	0.25	1	0.25	0.01
Europio	0.75	0.75	0.25	1	0.25	0.04
Gadolinio	0.75	0.25	0.25	1	0.25	0.09
Terbio	0.75	0.75	0.25	1	0.25	0.04
Disproso	0.75	0.75	0.25	1	0.25	0.04
Holmio	0.75	0.75	0.25	1	0.25	0.04
Erbio	0.75	0.25	0.25	1	0.25	0.02
Wolframio	0.75	0.25	0.75	1	0.25	0.07

Se puede apreciar en la Tabla 25 que los elementos de mayor valor son; Germanio, Escandio, Galio y Cobalto. Es importante mencionar que a pesar de que no se considera un mineral estratégico, el Cobre presenta una ley de un 0.3% y debido a su demanda y técnicas de concentración es importante considerarlo.

La Figura 14 y la Figura 15 representan de manera gráfica la información entregada por la matriz de decisión, Tabla 25, mostrando que para elementos como el cobre, su mayor valor se encuentra en la alta demanda y gran concentración, mientras que para elementos como el Galio, su escasez de fuentes alternativas y alto riesgo de suministro, aportan un gran porcentaje del total.

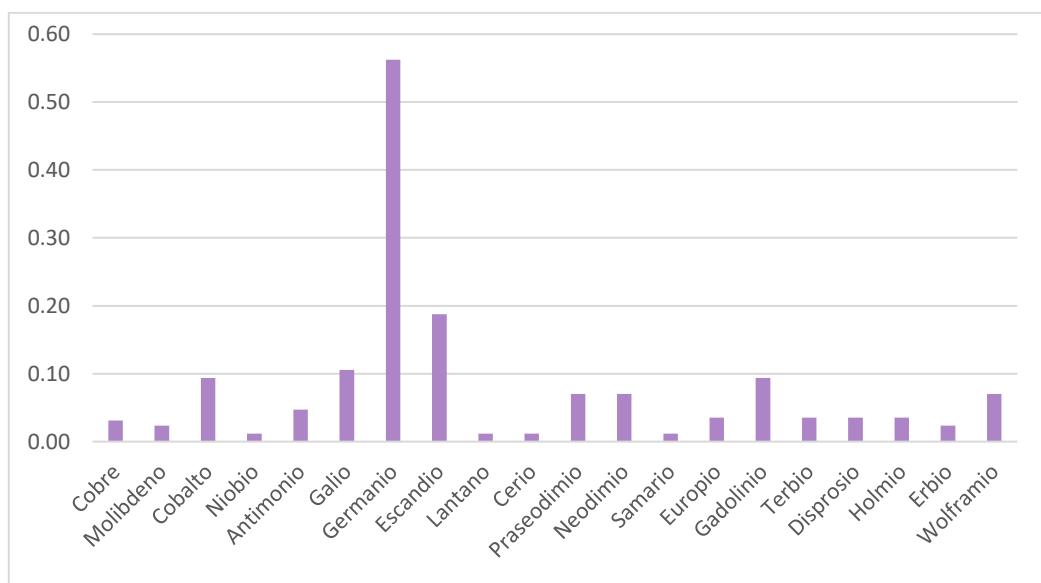


Figura 14: Resumen de la matriz de decisión

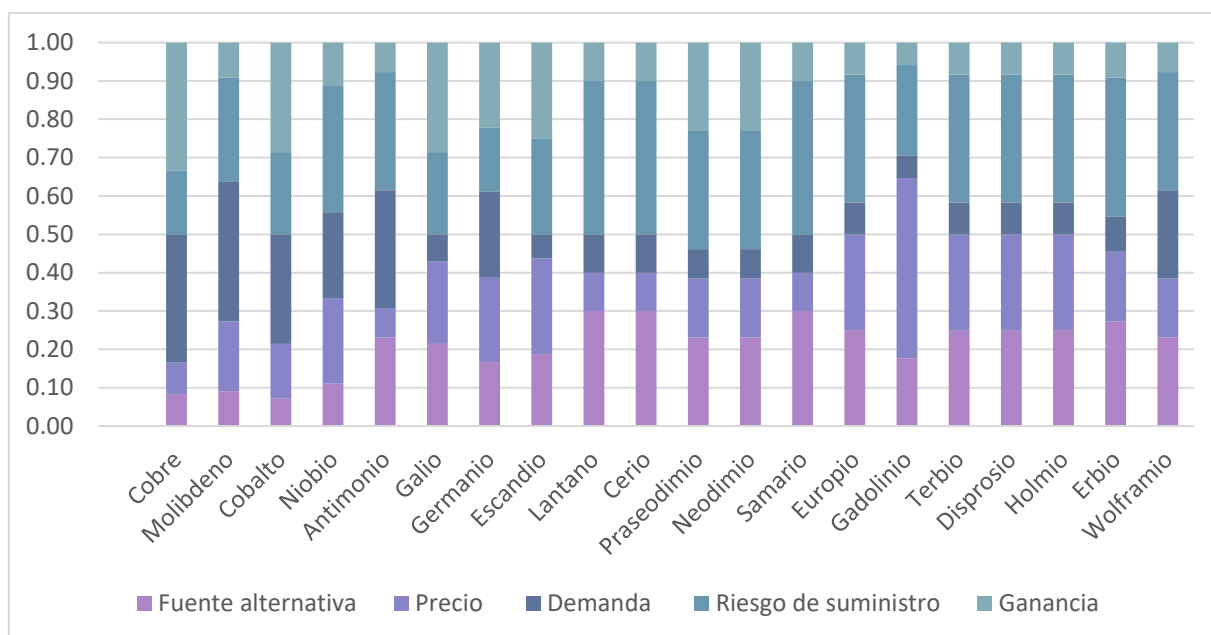


Figura 15: Aporte de cada indicador a los elementos de selección

En base a esto y a la información proporcionada por todo el estudio, los minerales escogidos son Galio, Germanio, Cobalto y Cobre. La selección del Galio y Germanio se debe a que la concentración presentada en el relave es similar a la ley de cabeza que registran plantas de procesamiento actuales, además ambos elementos se presentan como las dos posibles opciones de materiales en celdas fotovoltaicas de alta tecnología, siendo favorable para el programa solar que Chile está implementando, con miras de posicionarse como una potencia solar.

En el caso del Cobalto, a pesar de que la ley de cabeza es inferior a la presentada en faenas mineras del principal productor, la República Democrática del Congo, la importancia de este mineral para nuestro país se basa en aspectos estratégicos del creciente mercado de las baterías de Litio, donde Chile ocupa una posición importante por poseer la mayor cantidad de reservas mundiales de Litio.

A pesar de que el Escandio presenta un alto valor en la matriz de decisión, es un mineral que no se transa en la bolsa de metales y que además en la actualidad tiene una muy baja demanda, sin embargo, es importante tener en cuenta este elemento debido a que se proyecta un alza por sus aplicaciones tecnológicas.

La Tabla 26 muestra a manera de resumen, los parámetros que cada elemento seleccionado posee.

Tabla 26: Resumen de elementos seleccionados

Elemento	Fuente alternativa	Precio	Demanda	Riesgo de suministro	Ganancia
Cobre	>30	6	15.000.000	4.3	14
Cobalto	>30	60	123.000	7.6	6.6
Galio	<10	130	470	7.6	13
Germanio	<10	1400	160.000	8.1	15

En base a la elección de estos elementos, se confecciona la Tabla 27 que muestra los posibles minerales a cuáles están asociados.

Tabla 27: Minerales asociados a los elementos de interés

Elemento	Nombre	Formula	Composición
Ge	Briartita	$\text{Cu}_2\text{FeGeS}_4$	S=32.807; Fe=3.571; Cu=32.507; Ge=18.572
Ga	Gallita	CuGaS_2	S=32.488; Cu=32.191; Ga=35.320
Co	Carrolita	CuCo_2S_4	S=41.435; Co=28.557; Cu=20.528
Cu	Calcopirita	CuFeS_2	Cu=35,625; Fe=30.429; S=34.945

6. CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3

Para finalizar este capítulo, es importante comprender la fenomenología asociada a un yacimiento minero antropogénico, para esto es importante tener en consideración que estos poseen ventajas claras al compararlos con yacimientos tradicionales, tales como un tamaño de partículas reducidos, volúmenes definidos y exposición a la superficie, sin embargo, en términos de mineralógica, queda en evidencia la complejidad de poder analizar un sistema heterogéneo.

El caso estudio presentado, se basa en el análisis del tranque de relaves Coemin, de la empresa Minera Carola, ubicada en Tierra Amarilla, III región de Chile. Para este depósito, se utilizó un reporte de CORFO y SERNAGEOMIN que entrega un análisis químico de este. Este tranque de relaves, fue depositado de manera segregada, utilizando un medio de depositación sub aérea, que crea una complejidad mayor al momento de realizar una caracterización fidedigna de dicho relave.

El informe presenta resultados luego de muestrear tres puntos del relave a dos metros de profundidad, sin embargo, estos no son representativos, pues no logran considerar los tres parámetros más variables de un tranque de relaves; el tamaño de partículas, ley del mineral y liberación. En base a esto se cree que la información presentada no lo suficientemente representativa del volumen total del embalse.

Se propone un método más asertivo para caracterizar el relave, este consta de un muestreo con una mayor cantidad de puntos, que puedan abarcar de manera representativa, tanto la superficie como la profundidad del tranque, para así crear modelos geo estadísticos que sean más representativos, sin embargo, para este estudio de prefactibilidad, se utilizarán los análisis ya reportados.

Se crea una metodología que busca implementar una mirada más integral de un pasivo ambiental minero y así lograr seleccionar elementos a extraer. Para explicar el uso de la matriz de selección se debe comprender que esta está compuesta por 4 indicadores, dos de ellos representan la criticidad; riesgo de suministro y fuentes alternativas y además de dos más que representan variables económicas; demanda y precio. Por último, se considera una quinta variable para lograr integrar parámetros de concentración y precio, cuyo nombre es ganancia por toneladas. Mediante este análisis se logra crear una mirada más integral de un pasivo ambiental minero y así seleccionar de mejor forma los elementos a extraer.

Los elementos seleccionados son Galio, Germanio, Cobalto y Cobre, siendo esta información el punto de partida para el diseño de un proceso, que busca analizar la factibilidad económica de la extracción de estos de elementos, transformando un pasivo ambiental minero en un activo económico.

IV. CAPÍTULO 4: DISEÑO DE PROCESO BASADO EN CASO ESTUDIO PARA EVALUAR DE MANERA TÉCNICA LA EXPLOTACIÓN DE ELEMENTOS DE INTERÉS ECONOMICO.

Para poder comprobar la factibilidad técnica de realizar un proceso de extracción de Germanio, Galio, Cobalto y Cobre, es importante analizar las variables a considerar al momento de diseñar una planta, en este contexto se definen cuatro parámetros que son ilustrados en la Figura 16.



Figura 16: Parámetros de diseño

El primer parámetro es el tamaño de planta, considerando que este caso estudio será en específico para un tranque de relaves, el tamaño de planta se calculará considerando la masa total de este, 30 millones de toneladas y los años de operación de la planta.

A partir del parámetro tamaño de planta, podremos tener una perspectiva del porcentaje de la demanda mundial cubierta y para esto es importante integrar nuestro tercer parámetro, la pureza del elemento, dependiendo de la forma en como este se venda, variará su valor final.

Para comenzar con el diseño del proceso, es importante destacar etapas claves a considerar. En la Figura 17, se muestran las 7 principales etapas para un diseño eficiente.

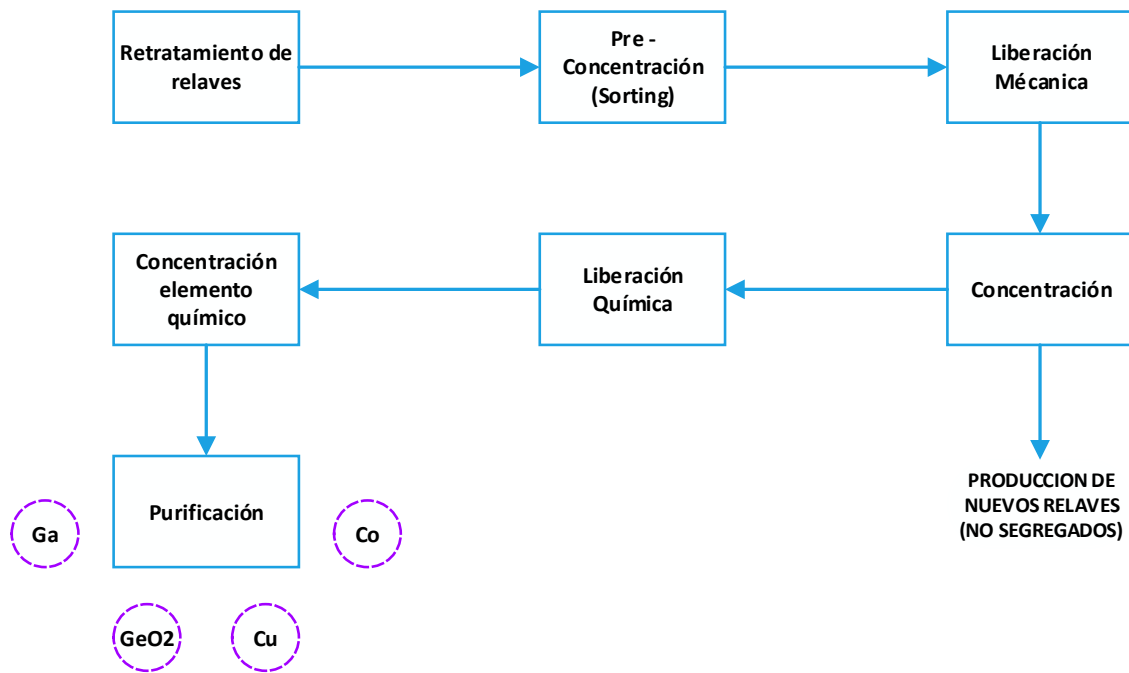


Figura 17: Etapas Claves del Diseño de Procesos

La primera etapa consta de la extracción del mineral desde el relave a la planta de procesamiento, esta etapa tiene como complejidad la utilización de grandes volúmenes de agua, para re-pulpear (formación de meandros) (poner nota definiendo el material del relave a la planta, siendo un desafío en términos ambientales y técnicos, debido a la necesidad inmanente de reutilizar la mayor cantidad de agua posible. Notar que las formaciones de meandros necesitan manejar la complejidad reológica del material a transferir.

El siguiente paso, consta de un pilar fundamental en casos de reprocesamiento de relaves, la pre concentración, debido a la cantidad de material a procesar, los procesos de pre concentración y concentración se tornan fundamentales para la viabilidad del proyecto. Para el diseño de este proceso, es importante destacar que los minerales de interés; Calcopirita, Briartita, Gallita y Carrolita, son minerales sulfurados asociados a cobre. La primera suposición para el diseño es considerar que los minerales de interés se encuentran en la fracción fina y en la fracción gruesa del yacimiento, esta suposición se basa en que, en el proceso previo a la depositación de relaves de la Minera Carola, no fue posible recuperar el mineral de interés en fracciones menores a 30 [µm] y mayores a 200 [µm], debido a esto se asume que, en el rango entre estos valores, se encuentra principalmente la sílica y el óxido de aluminio.

Posterior a esta etapa de pre concentración por tamaño, se utilizan separadores magnéticos, aprovechando las propiedades de la hematita, cuya susceptibilidad magnética es mucho mayor

al resto de los minerales en el proceso, la hematita se presenta como ganga y en esta etapa se busca eliminar gran parte de su masa.

Posterior a la pre-concentración, nos encontramos con una masa que se ha reducido a un tercio de la alimentación y dos corrientes, una con el mineral grueso y otra con el mineral fino. Para la corriente encargada de llevar el mineral grueso, se realiza una liberación mecánica, para reducir el tamaño a 110 [µm].

La siguiente fase, consta de un proceso de flotación colectiva, en esta etapa se busca concentrar Calcopirita, Briartita, Gallita y Carrolita, eliminando el contenido de pirita del proceso y restos de hematita, oxido de aluminio y silicatos. La flotación es un proceso heterogéneo, en donde es fundamental considerar las propiedades fisicoquímicas de las superficies de los minerales, la relación entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y sus interfases. Para el caso de esta selección colectiva, se deprime a los sulfuros con depresantes, como el Na_2S , sin embargo, dentro de los minerales sulfurados podemos encontrar pirita, mineral que es considerado como ganga en el proceso, en base a esto es necesario modificar el pH de la solución, para así lograr que no flote la pirita, pero que, si floten la Calcopirita, Briartita, Gallita y Carrolita, para esto se utilizan reguladores de pH, que aumenten la alcalinidad de la solución (Wills, 2006).

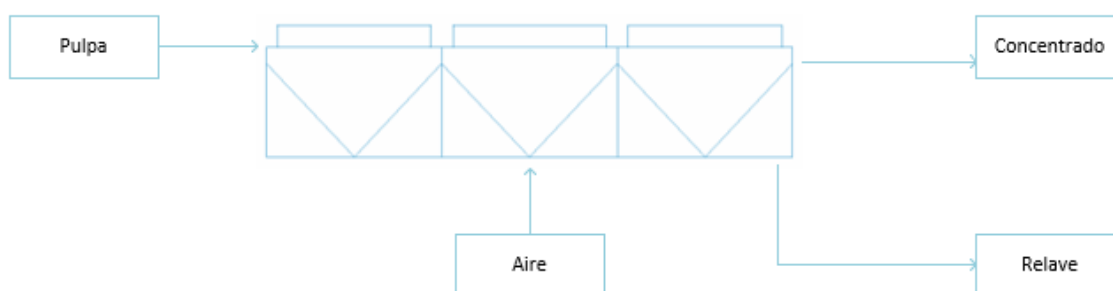


Figura 18: Diagrama Flotación

Las fases previamente descritas, corresponden a la pre-concentración (sorting) y concentración de minerales, en esta etapa se busca disminuir considerablemente la masa a procesar para luego pasar a una etapa de hidrometalurgia, que busca obtener nuestros productos de interés, mediante vías de lixiviación, extracción por solvente, purificación y electro obtención.

Posterior a la etapa de concentración, se busca realizar una liberación de especies química, para poder liberar el Cobalto, Germanio, Cobre y Galio. Esta liberación se realizará en un reactor autoclave, en donde se asume que todos los elementos se encuentran en la fase líquida del proceso para luego ser filtrados y estar listos para la siguiente etapa

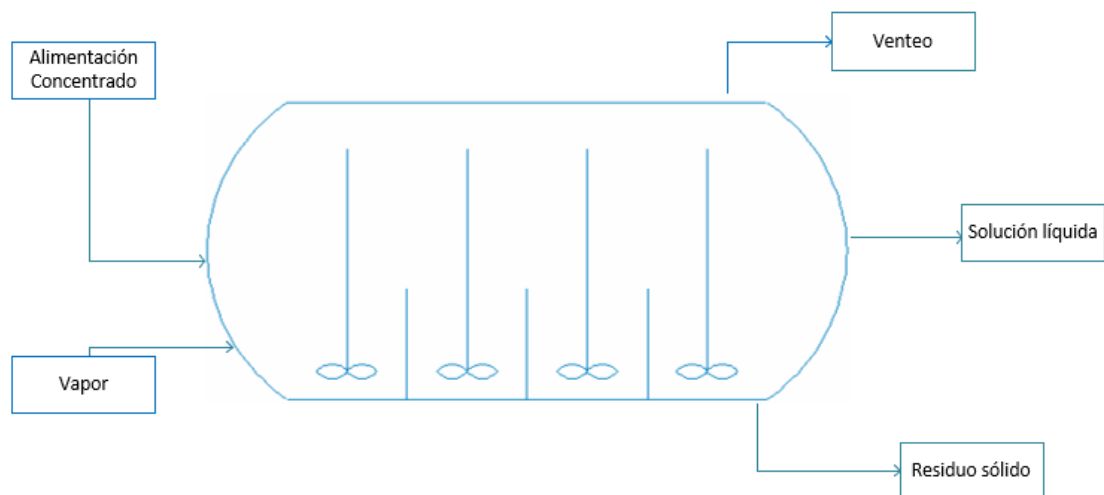
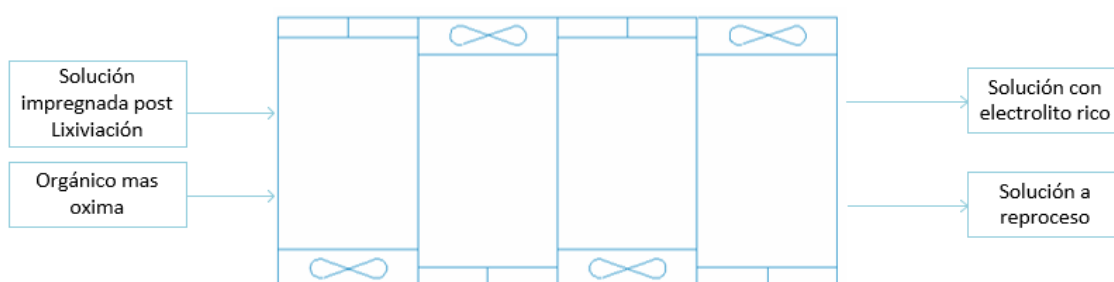


Figura 19: Diagrama Lixiviación Autoclave

Luego de la liberación química, se procede a una etapa de concentración por elemento químico, utilizando extracción por solventes por etapas, donde en cada etapa se busca recuperar cada elemento químico para la posterior purificación. Es importante destacar, que el proceso de extracción por solventes por etapas es un proceso utilizado para la extracción mediante vías hidrometalúrgicas de minerales críticos menores, cada proceso debe ser validado por pruebas experimentales, sin embargo, para el caso de tierras raras, los minerales se obtienen dependiendo su peso molecular, donde el primero en ser extraído es el con menor peso (Makanyire, 2016), siendo un proceso exitoso para lograr concentrar minerales menores, con concentraciones bajas, en donde la separación y recuperación de múltiples elementos es fundamental para viabilidad del proceso.



La purificación de cada elemento depende de la pureza comercial que se desee obtener, en el caso del Cobre, Cobalto y Galio, se busca obtener cátodos de 99 % de pureza, utilizando como técnica de purificación el electro obtención. Para el caso del Germanio, se comercializará como óxido de Germanio y se purificará mediante la precipitación con ácido clorhídrico y clorato de sodio (TORMA, 2008)

A continuación, en la

Figura 20, se presenta el diagrama del proceso de manera más detallada, esta información es crucial para realizar los balances de masa respectivos a cada etapa y luego obtener el porcentaje de cada elemento recuperado, para de esta forma poder realizar un análisis del tamaño de los equipos en la planta y la posterior evaluación económica.

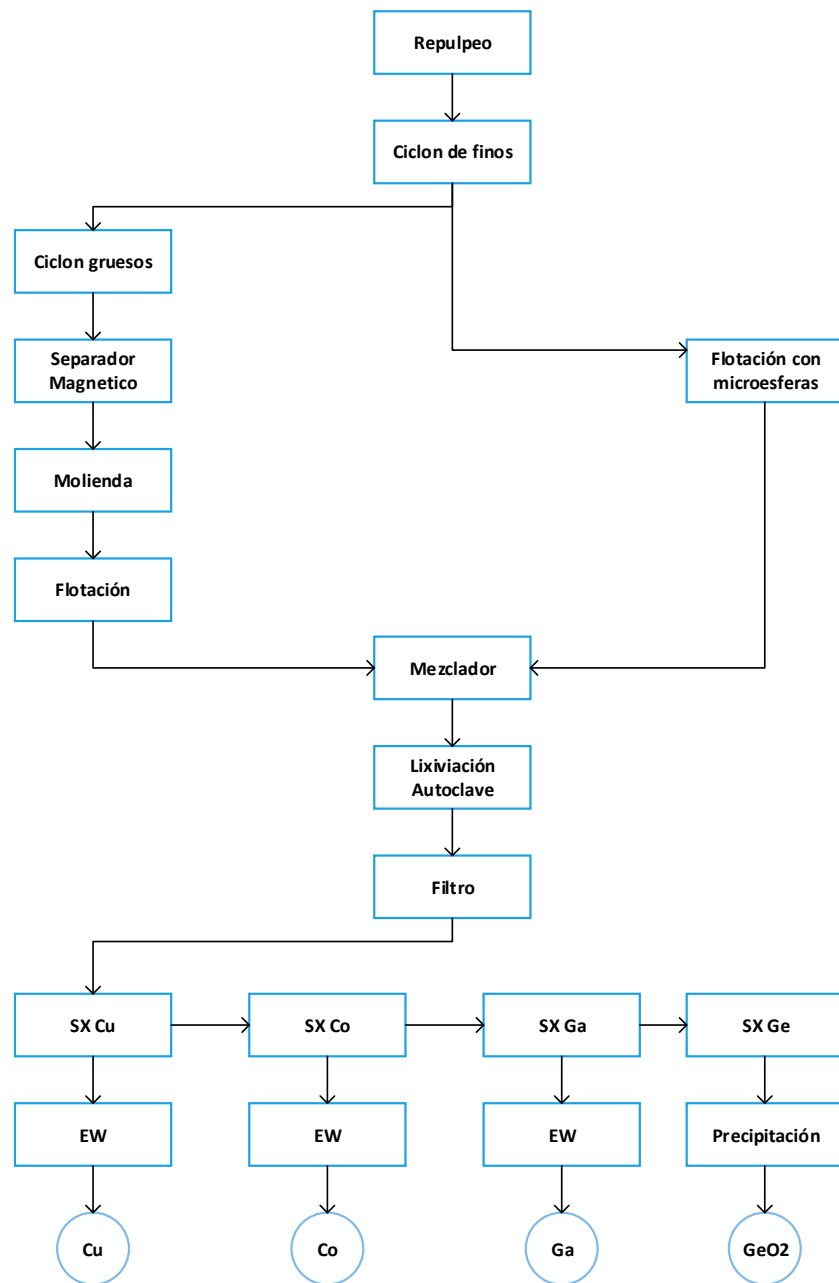


Figura 20: Diseño de proceso

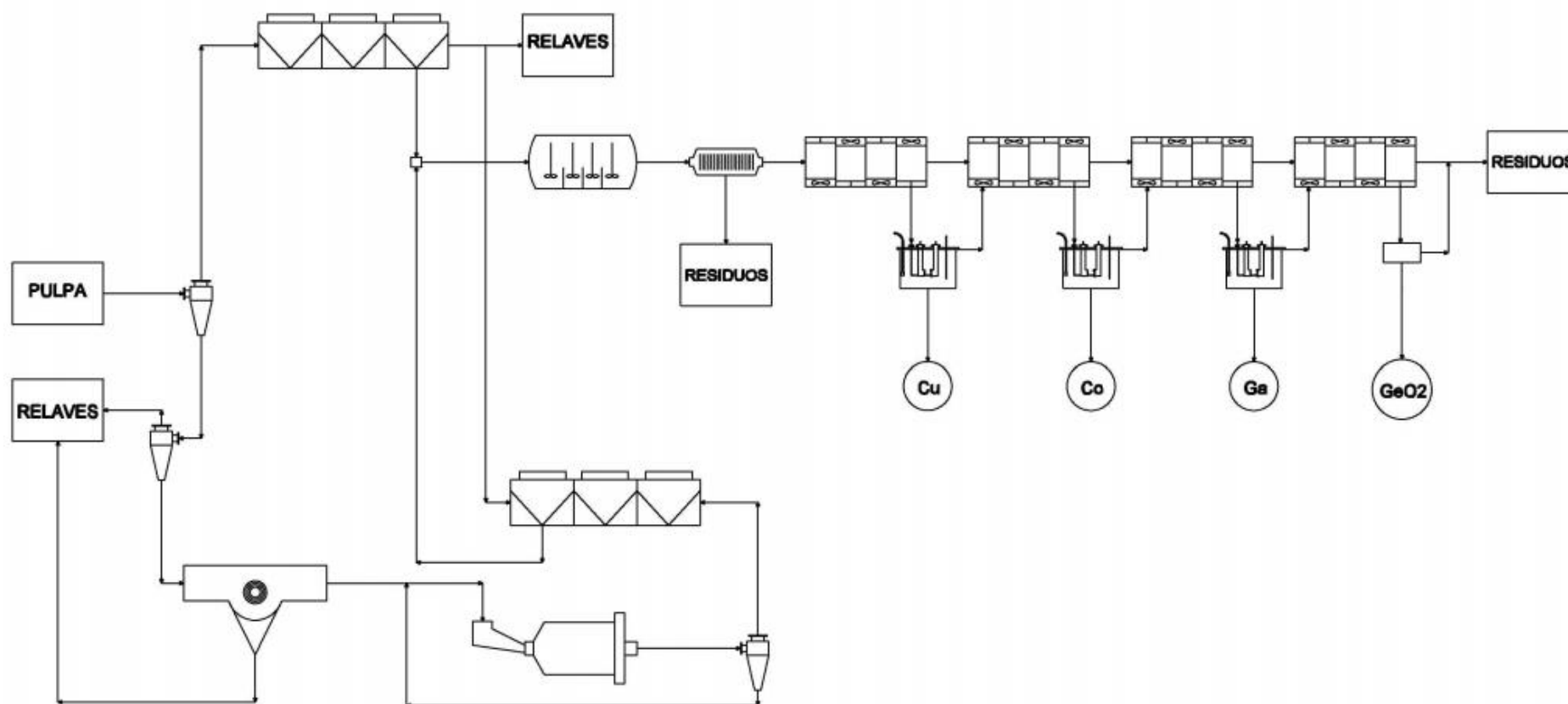


Figura 21: Diagrama de flujo de la planta

Figura 22: Diagrama de flujo proceso

En base al diagrama de la Figura 22, se realiza un balance de masa por especies, en donde la alimentación es de 340 [t/h] y la composición mineralógica de esta, se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28: Composición alimentación del proceso (CORFO, 2013)

Alimentación	
Compuesto	Porcentaje [%]
SiO_2	38
Al_2O_3	12
Fe_2O_3	27
$\text{Cu}_2\text{FeGeS}_4$	0.0021
CuGaS_2	0.0064
CuCo_2S_4	0.0151
CuFeS_2	0.3
FeS_2	22.6764

Para evaluar esta planta, se consideran los parámetros descritos en el inicio de este capítulo, como se puede apreciar en la Figura 16, el tamaño de la planta y la eficiencia del proceso inciden directamente en la demanda mundial cubierta para la especificación de productos de la planta, para esto se toma una línea base y dos contrapropuestas para ejemplificar este caso.

Tabla 29: Casos propuestos

	Años evaluación	Alimentación [t/h]	Eficiencia Etapa SX [%]
Caso 1: Línea Base	10	340	90
Caso 2: Cambio alimentación	7	490	90
Caso 3: Cambio eficiencia de proceso	10	340	0.675

Según estos compuestos y los balances descritos en el Anexo, se obtiene una cantidad anual de producto final que se presenta en la Tabla 34 para caso estudiado, en base a esto, se realiza el primer análisis que consta en comparar la demanda mundial de cada producto, con lo logrado en el proceso propuesto

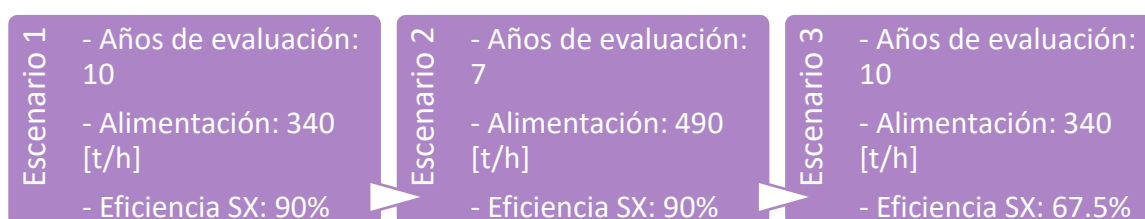


Tabla 30: Resultado de la propuesta al evaluar el proceso bajo un escenario específico de operación.

Producto	Cantidad [t/año] Caso 1	Cantidad [t/año] Caso 2	Cantidad [t/año] Caso 3
Cu	5.894	8.494	4.421
Co	270	389	202
GeO₂	33	48	25
Ga	96	139	72

Tabla 31: Porcentaje cubierto de la demanda mundial

Producto	Demanda Mundial [t/año]	Porcentaje cubierto [%] Caso 1	Porcentaje cubierto [%] Caso 2	Porcentaje cubierto [%] Caso 3
Cu	15.000.000	0.04%	0.06%	0.03%
Co	123.000	0.22%	0.32%	0.16%
GeO₂	160.000	0.02%	0.03%	0.02%
Ga	470	20.47%	29.5%	15.35%

La Tabla 31 muestra que los resultados de los escenarios explorados muestran que el porcentaje de la demanda mundial que se satisface corresponde a 20 % para el galio metálico en el escenario 1, 32% en el escenario 2 y 16% en el caso 3. Para el caso del cobalto el porcentaje cubierto por esta planta de producción corresponde a un 0,2% en el escenario 1, 0,32% en el escenario 2 y 0.16% en el escenario 3. El análisis muestra que para el óxido de germanio y cobre el porcentaje de la demanda cubierto es muy bajo para los tres escenarios.

Otro análisis importante que realizar tiene relación con el precio de cada producto y la ganancia según la producción, además como cada producto aporta un porcentaje distinto a la ganancia total. En la Tabla 32 se puede apreciar, que el Cobre y el Óxido de germanio, representan el mayor porcentaje de los ingresos por venta de la planta, de esta manera a pesar de ser los que tienen un porcentaje de demanda cubierta en el escenario mundial menor, aportan un 75% de los ingresos. Caso contrario sucede en la producción de Galio metálico, donde cómo se puede apreciar en la Tabla 31, este representa un 20% de la demanda mundial, sin embargo, en términos de ingresos, representa el menor porcentaje de la planta, aportando un 11% del total.

Tabla 32: Porcentaje de ingresos por productos

Producto	Producción [t]	Precio [USD/kg]	Ingresos [Mill USD]	Porcentaje ingresos
Cu	5894	6	35.36	32%
Co	270	60	16.20	15%
GeO₂	33	1400	46.48	42%
Ga	96	130	12.51	11%

Esta información es fundamental para la evaluación económica que validará la hipótesis de la factibilidad. La Figura 23 muestra de manera resumida el comportamiento de distintos escenarios para cada caso descrito.

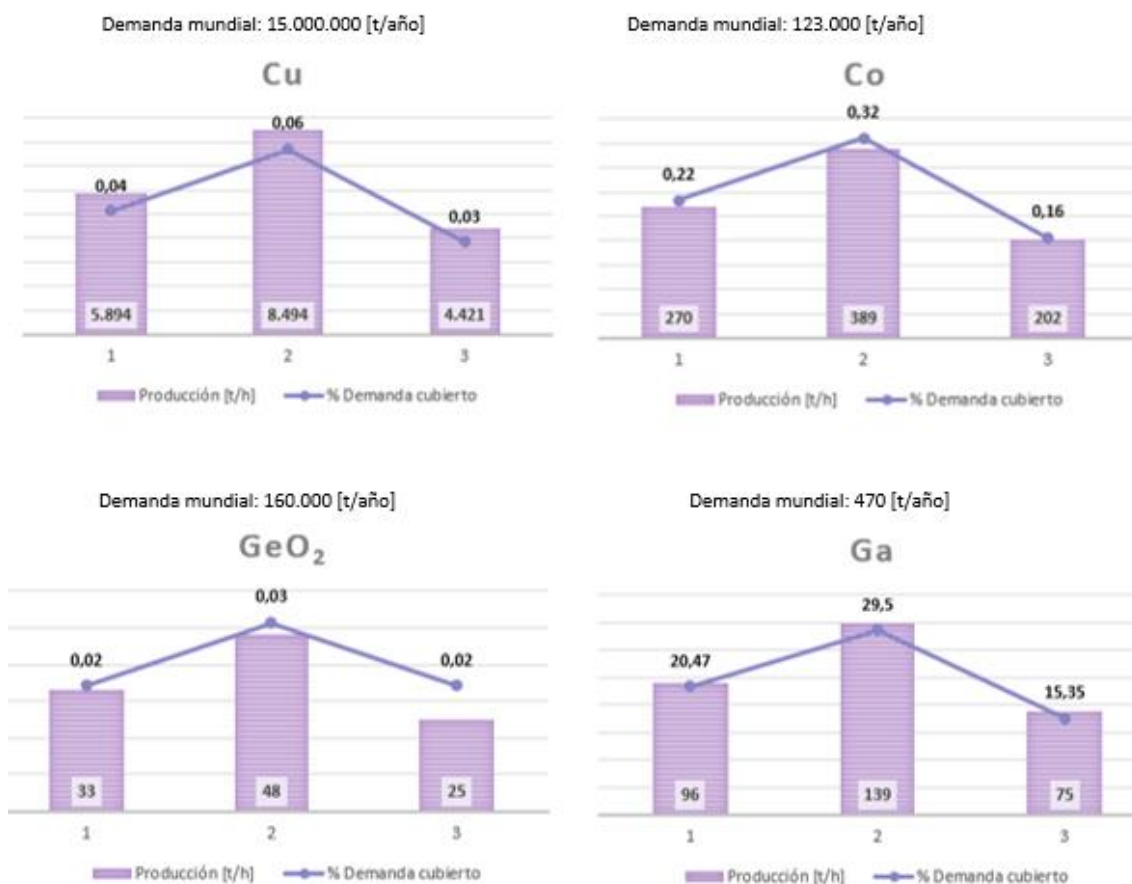


Figura 23: Resumen escenarios estudiados

Como conclusión de este capítulo, se considera un diseño de procesos que consta de tres etapas fundamentales, la primera es la pre concentración, en donde se busca eliminar gran parte de los óxidos presentes, que son considerados como ganga, para esto, se busca clasificar por tamaño, filtrando la porción fina y gruesa, esta hipótesis se basa en la ineficiencia del proceso anterior a la deposición de relaves, debido a que por flotación tradicional, el mineral valioso en dichos tamaños de partículas es muy poco factible recuperarlo. Posterior a la etapa de separación por tamaños, mediante hidrociclones, la fracción gruesa es pre concentrada mediante separación magnética, de esta manera, se busca disminuir el porcentaje de hematita en la alimentación principal.

Posterior a la pre concentración, se concentra los minerales valiosos mediante flotación, para el caso del mineral fino, es importante considerar lo complejo que es flotar mineral a este tamaño de partículas, es por esto por lo que se propone concentrar por medio de un sistema de

columnas de flotación con microesferas de vidrio funcionalizadas. Para la fracción gruesa del material, se utilizará un sistema de flotación tradicional con un proceso de molienda previo, para poder obtener un mineral con un P80 de 110 micrómetros.

Ambas corrientes provenientes de las dos etapas de concentración se juntan para pasar a la etapa hidrometalúrgica de purificación de cada elemento, para esto el primer proceso consta de una lixiviación autoclave, donde se busca liberar de manera química los elementos de interés, se considera como hipótesis que todos estos elementos se encontrarán en la fracción líquida del producto, por lo tanto posterior a esto, se separarán mediante extracción por solvente por etapas y posteriormente serán purificados por electro obtención y precipitación.

Posterior al proceso, se realiza un balance de masa y se analiza el porcentaje de la demanda mundial cubierta con respecto a la producción, en este caso se puede apreciar que los minerales que menor demanda abarcan, Germanio y Cobre, son a su vez lo que mayor porcentaje entregan al total de ingresos por ventas de minerales.

Considerando los parámetros técnicos analizados en este capítulo, se requiere realizar un estudio económico, para poder validar la factibilidad de realizar una planta con estas características.

V. CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN ECONÓMICA

La factibilidad económica de la planta propuesta se presenta como el análisis final para validar la hipótesis, de si se puede extraer valor de pasivos ambientales mineros mediante la extracción de CRM. Cabe mencionar que los procesos actuales de reprocesamiento de relaves buscan extraer valor, sin embargo, no buscan aportar a solucionar el problema actual que enfrenta el país en torno a los relaves, es por esto, que un objetivo de este trabajo de memoria es contribuir a no solo diversificar la matriz de extracción, sino que también, ser responsables con el medio ambiente, buscando minimizar el impacto de la depositación de relaves.

En base a lo planteado, se considera que el modelo económico de empresas clase B, es apropiado para este caso, por lo cual se plantea como alternativa a esta evaluación.

Las llamadas empresas B son aquellas que buscan resolver un problema social o medioambiental a través del mercado, tratando de generar solamente externalidades positivas en el entorno, bajo su lema “Ser la mejor empresa para el mundo, y no del mundo” su misión es realizar buenas prácticas con todos los stakeholders involucrados. Utilizar el poder privado para generar beneficios a las personas y el entorno, generar comunidades de práctica y conexiones entre los consumidores, proveedores, comunidad y entorno.

Las empresas B corresponden a un tipo de compañía que está certificada y cumple rigurosos estándares de sustentabilidad, transparencia, contabilidad y desempeño. Dado lo anterior, estas corporaciones buscan cumplir una misión dual. Por una parte, siguiendo el objetivo tradicional de los negocios, estas empresas quieren satisfacer y generar ganancias para los accionistas, creando un modelo de beneficio y sostenibilidad económica para sobrevivir en el corto y largo plazo, pero de igual forma, persiguen crear valor social, desde proteger a los empleados hasta resguardar el medio ambiente, aun así, esto signifique sacrificar ganancias en el corto plazo.

En base a este principio, este proyecto de tesis busca adoptar este modelo, principalmente por la necesidad inmanente de investigación y desarrollo para lograr comprender, explotar y remediar yacimientos antropogénicos como los relaves chilenos y así devolver a la comunidad espacios que representan un peligro en caso de no ser responsablemente depositados y monitoreados, cuya respuesta se encuentra en el yacimiento en sí mismo y en su posibilidad de generar valor mediante la explotación y re tratamiento de estos.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

TASA DE DESCUENTO

Considerando la naturaleza del proyecto que apunta a tener una categoría clase B, la tasa de descuento no necesariamente debe ser un 12% como los proyectos actuales, en base a esto y a reportes basados en análisis de este tipo de empresas (Harrison, 2010), se decide utilizar una tasa de descuento de un 8%.

EXPECTATIVA DE VIDA DEL PROYECTO

Los casos analizados, consideran una expectativa de vida del proyecto de 10 años y de 7 de años para los escenarios 1 y 2, en base a esto y al volumen fijo que posee este relave, se logra estimar la alimentación, de 340 [t/h] para el escenario 1 y 490 [t/h] para el escenario 2.

DEPRECIACIÓN DE LOS EQUIPOS

Se realiza una depreciación acelerada de todos los activos depreciables, para esto se consulta la tabla del servicio de impuestos internos con la respectiva duración anual de dicho beneficio tributario, se muestra la información en el Anexo junto con la lista de inversiones.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(+) Ingresos Operacionales		138.23	138.23	138.23	138.23	138.23	138.23	138.23	138.23	138.23	138.23
(-) Costos		67.00	69.01	71.08	73.21	75.41	77.67	80.00	82.40	84.87	87.42
(-) Pérdida Ejercicio Anterior											
(-) Depreciación		24.50	24.50	24.50	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20
UAI	0	46.73	44.72	42.65	64.51	62.32	60.06	58.03	55.63	53.15	50.61
Impuestos	0	14.02	13.42	12.79	19.35	18.70	18.02	17.41	16.69	15.95	15.18
UDI	0	32.71	31.30	29.85	45.16	43.62	42.04	40.62	38.94	37.21	35.42
(+) Depreciación		24.50	24.50	24.50	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20
(+) Valor Libro											
(-) Capital de trabajo	12										
(+) Pérdida Ejercicio Anterior											
(-) Inversión Activos Depreciables	180										
(-) Inversión Activos No Depreciables	10										
Flujo de Caja	- 192	57.21	55.80	54.35	45.66	44.12	42.54	40.82	39.14	37.41	35.62
VAN acumulado	- 192	- 139.028971	- 91.1879969	-48.04	-14.48	15.55	42.36	66.17	87.32	106	122.5

INDICADORES DE RENTABILIDAD

Los indicadores de rentabilidad que se analizarán para este flujo de caja son el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el payback, es decir año donde se recupera la inversión.

Tabla 33: Indicadores flujo de caja

TIR	22%
VAN	122
Payback	5

Se puede apreciar de la Tabla 33 que el valor actual neto para una tasa de descuento de 8% es de 122 millones de dólares, en un plazo de evaluación de 10 años, además la tasa interna de retorno es 22% superior a la tasa interna prevista, por lo tanto, el proyecto se considera factible, recuperando la inversión en un plazo de 5 años

VI. CAPITULO 6: CONCLUSIONES CONTRIBUCIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Actualmente existen 15 billones de toneladas de relaves autorizados en Chile, de las cuales 9 billones ya se encuentran en diversos tipos de depósitos de pasivos ambientales mineros, siendo el más habitual el tranque de relaves. Un tranque de relaves presenta un problema social y ambiental que, además, debido a su alto impacto, está muy presente en la sociedad, siendo uno de los principales motivos de rechazos a proyectos mineros. Debido a esto se presenta como un desafío el poder realizar algún cambio en el modelo actual de desechos mineros, en donde se presentan estos como pasivos ambientales.

En base a este antecedente y a un llamado internacional de intensificar la explotación de un grupo de elementos considerados estratégicos, CRM, se construye la hipótesis de buscar valor asociado a minerales estratégicos presentes en relaves mineros chilenos, por medio de un estudio de pre factibilidad técnica y económica.

Se toma un caso estudio para comprobar esta hipótesis, debido a la complejidad de diseñar procesos en un sistema heterogéneo, donde la liberación, tamaño de partículas y ley se encuentran de manera segregada en distintas partes del relave. Para el caso estudio se analiza un informe mineralógico de SERNAGEOMIN y CORFO, en donde, se destaca que debido a la gran incertidumbre de muestreo no es concluyente, sin embargo, se considera como un punto de partida para poder realizar un análisis de mineralogía, estrategia de decisión, diseño de proceso y evaluación económica.

La estrategia de decisión para explotar este relave se basa en criterios de mercado, pero además de criticidad, introduciendo este punto, como un pilar fundamental del trabajo de tesis y así realizando un análisis integral de un futuro modelo de negocios. Para el caso del relave Coemin, se decide procesar Germanio, Cobre, Cobalto y Galio

En base a criterios relevantes en la explotación de este tipo de yacimientos, se realiza una propuesta de diseño de procesos para el caso estudio del relave Coemin, en donde se destaca la importancia de las tecnologías de pre concentración, en este caso utilizando las propiedades magnéticas y tamaños de partículas, debido a que en esta etapa se busca disminuir en un 40% la cantidad de mineral a alimentar. Posterior a esto se realiza un proceso de flotación colectiva de los sulfuros que poseen los elementos de valor, siendo la pirita eliminada como relave, mediante técnicas de disminución de pH. La última etapa del proceso se realiza por vías

hidrometalúrgicas, en donde se realiza una etapa de lixiviación autoclave, extracción por solvente y purificación de cada elemento.

Este diseño de proceso, se presenta en tres escenarios diferentes, en donde se tiene una línea base y luego se modifica la alimentación del proceso, disminuyendo el tiempo de vida útil de la planta y un tercer caso en donde se disminuye la eficiencia del proceso, mostrando que en términos de demanda abarcada los elementos que menor importancia tienen son el óxido de germanio y el cobre, sin embargo, al momento de evaluar el aporte de ingresos que estos elementos generan, el escenario se invierte y representan un 75% de los ingresos de la planta.

Posterior al estudio técnico, donde se plantea un proceso, se realiza un análisis económico, en donde se busca validar la hipótesis mediante su factibilidad económica. Para el caso estudio la tasa interna de retorno es de un 22% y el valor actual neto del proyecto es 220 millones de dólares, siendo indicadores positivos y comprobando la hipótesis, de que, mediante un proceso por vías hidrometalúrgicas y estrategias de decisión, se puede extraer valor de pasivos ambientales mineros mediante la extracción de CRM, para así plantear un modelo de negocios que busca diversificar la matriz extractiva de minerales.

CONTRIBUCIONES

La contribución principal de este trabajo de tesis es plantear el reprocesamiento de relaves desde un punto de vista de la extracción de valor que logre salir de lo tradicional en el país, que se enfoca solamente en cobre y molibdeno y que además deposita los relaves de este reproceso de manera segregada. La propuesta de tesis busca diseñar un proceso por vías hidrometalúrgicas, que sea factible económicamente para la extracción de Germanio, Cobre, Galio y Cobalto.

RECOMENDACIONES

La primera recomendación tiene que ver con el análisis que se ha utilizado para realizar esta propuesta, siendo identificado con una gran incertidumbre, una recomendación para trabajos posteriores es tener información de manera geoestadística del comportamiento del relave en su volumen.

Se plantea dentro del contexto de un estudio de prefactibilidad el poder realizar el diseño de procesos presentado, sin embargo, para lograr avanzar a una etapa con menor incertidumbre, es importante realizar pruebas de laboratorio a cada proceso descrito.

El diseño de procesos planteado abarca cada unidad de manera general, sin embargo, considerando las técnicas específicas de cada etapa, se recomienda realizar análisis de circuitos de cada etapa, para así lograr la mayor eficiencia individual y de procesos.

VII. REFERENCIAS

- Balance. (2015). *The balance*. Obtenido de <https://www.thebalance.com/metal-profile-cobalt-2340131>
- Banco Mundial. (2014). *Banco Mundial*. Obtenido de Banco Mundial: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/03/13/making-mining-revenues-deliver-on-development-in-latin-america>
- Benito, M. R. (2008). *Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the Worldwide context*. Elsevier.
- Biblioteca del congreso nacional. (Agosto de 2012). *Biblioteca del congreso nacional*. Obtenido de Biblioteca del congreso nacional: <https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial-19-5-2015/pasivos-ambientales-minero-en-chile>
- Britannica. (2014). *Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/cobalt-processing>
- Büttner, P. (2017). *Recovery potential of flotation tailings assessed by spatial modelling*. Mineral Engineering.
- CDI. (2016). *Euromonitor, Instituto de Desarrollo del Cobalto (CDI)*. . Obtenido de (U.S. Geological Survey, Euromonitor, Instituto de Desarrollo del Cobalto (CDI)).
- CEC U Chile. (2016). *CEC U Chile*. Obtenido de <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/ECONOMIA%20MINERA.pdf>
- CNR. (2016). *Canadian Natural Resource*. Obtenido de <https://www.cnrl.com/corporate-responsibility/advancements-in-technology/managing-tailings---horizon-oil-sands>
- CODELCO. (2014). *CODELCO*. Obtenido de CODELCO: <https://www.codelco.com/recursos-y-reservas-mineras/memoria2012/2013-04-16/103545.html>
- Codelco. (2016). *Codelco Educa*. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_exploracion.asp
- Comisión minerales Unión Europa. (2013). *REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU*.
- Conejaria, C. (2016). *EFFECTO DE LA FÁBRICA Y LA ESTRUCTURA EN LA RESISTENCIA NO DRENADA DE RELAVES*.
- Congreso Nacional. (2014). *Ley 20.551*. Biblioteca del congreso nacional.
- Consejo Minero. (2017). *Chile Pais minero*. Obtenido de <http://www.consejominero.cl/chile-pais-minero/>
- Consejo Minero. (2017). *Mineria en cifras*. Obtenido de <http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2017/09/mineria-en-cifras-Agosto-2017-1.pdf>
- CORFO. (2013). *Identificar elementos de valor en residuos mineros (relaves)*.
- Critical Raw Materials. (2016). *Critical Raw Materials*. Obtenido de <http://criticalrawmaterials.org/antimony/>
- CRM. (2016). *Critical Raw Material*. Obtenido de <http://criticalrawmaterials.org/chromium/>
- CRM. (2016). *Critical Raw Materials*. Obtenido de <http://criticalrawmaterials.org/pgms/>
- CRM. (2016). *CRM*. Obtenido de <http://criticalrawmaterials.org/gallium/>

CRM. (08 de Septiembre de 2017). *Critical Raw Material*. Obtenido de <http://criticalrawmaterials.org/beryllium/>

EU. (2014). *REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU*.

Fourie, A. (2012). Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for surface deposition. En *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Scielo.

Geoscience Australia. (2016). *Geoscience Australia*. Obtenido de <http://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/aimr/tungsten>

Geosciences Australia . (2013). <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/mineral-resources/rare-earth-elements>.

Gy, P. (1979). *Sampling of Particulate Materials Theory and Practice*.

Harrison, M. (2010). *Valuing the Future*.

Hernández, M. F. (2016). *Analysis of the impact of the March 2015 flood on the tailings deposits in the Copiapo valley*.

Industrial minerals. (2017). *Industrial minerals*. Obtenido de http://www.imana.org/page/what_are_borates

Infomine. (2017). *Infomine*. Obtenido de <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/ferro-tungsten/>

Ingeniería de Minas U. de Chile. (2017). *Minas U Chile*. Obtenido de <http://www.minas.uchile.cl/fotos/135788/presentacion-informe-de-inversion-minera-en-chile>

INMIN. (2017). *Industrial Mineral*. Obtenido de <http://www.indmin.com/Article/3223636/Acid-grade-fluorspar-prices-from-China-tumble.html>

IPA. (2015). *Internacional Platinum Association*. Obtenido de <http://ipa-news.com/index/pgm-applications/>

JIANG, H. (2007). Extraction Processes for Gallium and Germanium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*.

LME. (2017). *London Metal Exchange*. Obtenido de <https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=0>

Makanyire, T. (2016). *Separation and recovery of critical metal ions using ionic liquids*.

Matthey Platinum. (2014). *Platinum Matthey*. Obtenido de <http://www.platinum.matthey.com/about-pgm/production/south-africa>

Metalary. (2017). *Matalary*. Obtenido de <https://www.metalary.com/niobium-price/>

Mineral Prices. (2017). *Mineral Prices*. Obtenido de <http://mineralprices.com/default.aspx#min>

Mining Press. (2015). Accidente de relave Samarco. *Mining Press*. Obtenido de <http://www.miningpress.com/nota/290063/el-tragico-accidente-del-relave-de-samarco-en-minas-gerais-cronicas-y-video>

Mining Weekly. (2017). Obtenido de <http://www.miningweekly.com/print-version/ivanhoe-plans-new-era-of-production-for-historic-drc-mine-2017-09-06>

Ministerio de minería . (2016). *Minería y Desarrollo Sostenible de Chile. Hacia una Visión Compartida (2014)*.

- MIT. (2015). *Massachusetts Institute of Technology: MIT*. Obtenido de Massachusetts Institute of Technology: MIT: <http://energy.mit.edu/news/new-solar-cell-efficient-costs-less-counterparts/>
- Moss. (2006). *Amerigo Resource*. Obtenido de http://www.amerigoresources.com/_resources/MossPoblete_March2006.pdf
- Price Metal. (2017). *Price Metal*. Obtenido de <https://price.metal.com/prices/indium-germanium-gallium>
- Programa Alta Ley. (2015). Obtenido de (http://programaaltaley.cl/wp-content/uploads/2015/10/Mineria-_Una_Plataforma_de_Futuro_para_Chile_web.pdf)
- Programa Alta Ley. (2016). Obtenido de <http://programaaltaley.cl/archivo-iniciativas/relaves/>
- Roskill. (2013). *Roskill Information Services (September 2013) and other data presented in the extended profiles*.
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de Royal Society of Chemistry: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/27/cobalt>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de Royal Society of Chemistry: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/24/chromium>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de Royal Society of Chemistry: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/31/gallium>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/32/germanium>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/41/niobium>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/41/niobium>
- RSC. (2016). *Royal Society of Chemistry* . Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/12/magnesium>
- RSC. (2017). *Royal society of chemistry*. Obtenido de Royal society of chemistry: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/5/boron>
- RSC. (2017). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/51/antimony>
- RSC. (2017). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/4/beryllium>
- RSC. (2017). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/9/fluorine>
- RSC. (2017). *Royal Society of Chemistry*. Obtenido de Royal Society of Chemistry: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/49/indium>
- SERNAGEOMIN. (2015). *Sernageomin*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/relaves/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>
- SERNAGEOMIN. (2016). *Catastro de depositos de relaves* .

SERNAGEOMIN. (2016). *Catrazto de relaves mineros*. Santiago.

SERNAGEOMIN. (Diciembre de 2016). *Sernageomin*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/relaves/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>

SMM. (2017). *Shangai Metal Market*. Obtenido de <http://original.metal.com/metals/productinfo/201102250108>

TORMA, A. E. (2008). *Extraction Processes for Gallium and Germanium*.

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2017-indiu.pdf>

USGS. (2010). *U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK*.

USGS. (2013). *Compilation of Gallium Resource Data for Bauxite Deposits*.

USGS. (2016). *United State Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/beryllium/mcs-2017-beryl.pdf>

USGS. (10 de Septiembre de 2016). *USGS*. Obtenido de [USGS: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/antimony/mcs-2016-antim.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/antimony/mcs-2016-antim.pdf)

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de [U.S Geological Survey: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2017-cobal.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2017-cobal.pdf)

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/chromium/mcs-2017-chrom.pdf>

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de 4.400 MT

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2017-galli.pdf>

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2017-germa.pdf>

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2017-niobi.pdf>

USGS. (2017). *U.S Geological Survey*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/mcs-2017-mgcom.pdf>

USGS. (2017). *USGS*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/beryllium/mcs-2017-beryl.pdf>

USGS. (2017). *USGS*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2017-galli.pdf>

USGS. (2017). *USGS*. Obtenido de [USGS: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/boron/mcs-2016-boron.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/boron/mcs-2016-boron.pdf)

USGS. (2017). *USGS*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/mcs-2017-tungs.pdf>

USGS. (2017). *USGS*. Obtenido de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/>

Wills, B. (2006). *Mineral Processing Technology*. Elsevier.

World Nuclear Association . (2017). *World Nuclear Association* . Obtenido de <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/namibia.aspx>

VIII. ANEXOS

1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA MEDIANTE TÉCNICA ICP-MS

Compuesto	Porcentaje
SiO ₂	38
Al ₂ O ₃	12
TiO ₂	0.4
Fe ₂ O ₃	27
CaO	4.1
MgO	6.6
MnO	0.2
Na ₂ O	0.8
K ₂ O	3.9
P ₂ O ₅	0.3
SO ₃	1

Elemento	PPM	Elemento	PPM
La	176.7	Tb	0.4
Ce	288.1	Dy	1.8
Pr	22.8	Ho	0.4
Nd	56.2	Er	1.1
Sm	5.9	Tm	0.1
Eu	1	Yb	1.2
Gd	4.3	Lu	0.2

Elemento	PPM	Elemento	PPM
Cu	2923	Sr	99
V	200	Y	11
Cr	43	Zr	186
Co	157	Nb	4.5
Ni	103	Ba	851
Zn	1000	Pb	39
Rb	50	Sc	9.6

Elemento	PPM
Cs	1.6
Hf	4.5
Ta	0.8
Th	3.9
U	1.4

Elemento	PPM	Elemento	PPM
As	21	Bi	9.5
Mo	4.5	W	13
Sb	13	Se	0.9
Sn	15	Te	17
Ag	1.5	Ga	64
Cd	1.9	Ge	21

2. CRITERIOS EVALUACIÓN ECONÓMICA

Inversiones	Porcentaje	Valor [M USD]	Total
Equipos	25	45	180
Instalación de equipos	10	18	
Instrumentación y Control	5	9	
Piping	10	18	
Red Electrica	10	18	
Construcción edificios	15	27	
Instalaciones de servicio	15	27	
Terreno	4	7.2	
Mejora terreno	6	10.8	

Equipos	Valor (MUSD)	Años depreciación	Valor Libro	Depreciación
		Acelerada	(MUSD)	Anual
Correa	12460	3	1246	3738
Maquina Flotación RCS	9000	3	900	2700
Molienda	16113			
Correa	4589	3	458,9	1376,7
Harneros	613	3	61,3	183,9
Tolva	1383	3	138,3	414,9
Alimentador	93	3	9,3	27,9
Mixer Settler		3	846	2538
Edificio UFG	975	26	97,5	33,75
Lixiviación autoclave	16502	3	1650	5550
Correa	1462	3	146,2	438,6
Acopio Fino	1870	3	187	561
Aglomeración y acidificación	1517	3	151,7	455,1
Reactor Autoclave	8290	3	829	2487

Manejo Soluciones	3363		336,3	
Extracción por solventes	7860	3	786	2358
Membranas	14000	3	1400	4200
Electro Obtención	7979			
Celda Electro Obtención	1608	3	160,8	482,4
Circuito Hidráulico	1435	3	143,5	430,5
Circuito Eléctrico	335	3	33,5	100,5
Edificio EW	4190	26	419	14,5
Almacenamiento Catados	63	3	6,3	18,9
Ventilación y Lavado de Gases	348	3	34,8	104,4
Tranque relaves	1789	3	178,9	536,7
Infraestructura	31612		3161,2	
Edificios	1920	26	192	6,64
Caminos	4058	6	405,8	608,7