

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO-CHILE



**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA
RECUPERACIÓN DE TIERRAS RARAS DESDE TRANQUES DE
RELAVE EN CHILE**

FRANCISCA MICHELLE VALDÉS MUÑOZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PROFESOR GUÍA:

PATRICIO ANTONIO NÚÑEZ MUÑOZ

PROFESOR CORREFERENTE:

RODRIGO FEDERICO BENAVIDES VALENZUELA

ENERO - 2025

Resumen

El presente informe evaluó la factibilidad técnico-económica del servicio de procesamiento de relaves mineros chilenos con el objetivo de recuperar tierras raras y cobre, mediante un contrato de tipo maquila, es decir, un acuerdo en el cual el dueño del relave mantiene la propiedad mientras que el procesamiento lo realiza un tercero. Esta propuesta aborda dos desafíos clave: por un lado, el manejo responsable de los residuos mineros, denominados pasivos ambientales, que representan un riesgo significativo para la vida, la salud de las personas y el medio ambiente; y por otro, el creciente aumento en la demanda de productos basados en tierras raras, ya que estos elementos tienen usos esenciales para la construcción de dispositivos compactos y eficientes que permiten el desarrollo de tecnologías sostenibles.

El análisis se centra en determinar la viabilidad económica del servicio, aprovechando residuos mineros para generar productos de alto valor añadido: carbonato mixto de tierras raras y, como subproducto, concentrado de cobre. Este proyecto tiene un enfoque polimetálico y de economía circular, contribuyendo al desarrollo sostenible de la industria minera.

La metodología adoptada incluyó estudio del mercado de las tierras raras, revisión bibliográfica de técnicas de remoción de relave y tratamiento de minerales para extraer las tierras raras, análisis de las materias primas para seleccionar un depósito de relave, considerando leyes de cobre, tierras raras, masa de relave y posibles soluciones para abordar los problemas socioambientales, diseño de proceso que se adapte a las propiedades físico-químicas del relave, estimación de costos de inversión y operación, clasificados en costos fijos y variables, determinación de los aspectos legales y ambientales del proyecto y finalmente, análisis de rentabilidad basado en cinco casos distintos para evaluar que alternativa tiene mayores beneficios económicos, complementado por un análisis de sensibilidad.

El estudio de mercado revela el dominio de China con una participación del más del 60% en la extracción de mineral para la producción de productos intermedios y con una capacidad para refinar estos elementos superior al 90%. Además, se proyecta un aumento en el valor del mercado de las tierras raras, indicando una escasez de proveedores lo que permite la entrada de nuevos actores y que otros países aumenten su capacidad de procesamiento.

En el estudio técnico se identificaron varias técnicas de procesamiento. Dentro de los procesos de separación física destacan la separación gravimétrica, que resulta efectiva debido a que los minerales de tierras raras presentan gravedades específicas entre 2,9 y 7,2, mientras que la ganga tiene valores cercanos a 2,5; la separación magnética, que aprovecha las diferencias en el coeficiente de magnetización específico, permitiendo que los minerales de tierras raras, al ser paramagnéticos, sean atraídos levemente por campos magnéticos; y, por último, el proceso de flotación, ampliamente utilizado en la industria de las tierras raras debido a su alta eficacia en la separación de estos minerales. Las tecnologías estudiadas para la etapa de hidrometalurgia se pueden agrupar en tratamientos ácidos y alcalinos. Ambos procesos incluyen un uso intensivo de reactivos químicos y también la formación de gases que pueden llegar a ser letales. Sin embargo, los residuos generados por el tratamiento ácido tienen un menor impacto en el medio ambiente, además de que es más flexible en cuanto a si el yacimiento es de alta o baja ley.

Revisadas las tecnologías, se analizan las materias primas, siendo el depósito de relave seccionado el Tranque 4 de la mina El Soldado de Anglo American. Este depósito tiene una ley de cobre de 0,18% y de total de tierras raras 0,02% y una masa de 80 millones de toneladas. Además, en la mina se encuentran otros cuatro relaves, que pueden ser procesados, sumando un total de 268 millones de toneladas, los que se consideran en la producción para la evaluación económica. El proceso diseñado consiste en cuatro etapas: remoción de relave con camión y pala, molienda con molino de bolas y una batería de ciclones, etapa de beneficio que considera operaciones de separación gravimétrica, flotación de cobre y tierras raras, y una última etapa de hidrometalurgia, que mediante reacciones químicas las tierras raras se disuelven y se precipitan para obtener carbonato mixto de tierras raras.

La evaluación económica del servicio de procesamiento estimó una inversión inicial de 234,8 millones USD, con una tasa de descuento del 14%, un periodo de evaluación de 10 años, y tarifas de venta de 1.483 USD/ton para cobre y 4.095 USD/ton para carbonato mixto de tierras raras. Los resultados mostraron un VAN de 245,5 millones USD, una TIR del 35% y un periodo de pago de la inversión de tres años. En contraste, la producción solo de cobre presentó un VAN de 146,8 millones USD y una TIR del 29%, con un periodo de recuperación en el cuarto año. Ambas alternativas son atractivas económicamente, sin embargo al incluir las tierras raras, los beneficios económicos aumentan significativamente. Además, al evaluar la producción gestionada por el cliente, utilizando los precios de mercado para ambos productos, se obtiene un VAN de 472,2 millones USD, lo que, aunque genera mayores beneficios económicos, también implica mayores riesgos para el dueño.

Finalmente, el modelo de servicio propuesto para la producción carbonato mixto de tierras raras y concentrado de cobre bajo un contrato de maquila, ofrece una solución económicamente atractiva tanto para el cliente como para la maquiladora. No obstante, el análisis de sensibilidad demuestra una fuerte dependencia tanto de las leyes de cobre y la eficiencia de extracción de este mismo, ya que si son muy bajas el proyecto no es rentable económicamente. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio profundo sobre la ley de cobre en el relave para estimar una producción estratégica que asegure el éxito del servicio.

Agradecimientos

Este proceso fue todo menos fácil y finalmente lo logramos. ¿Por qué en plural? Porque toda mi familia me ayudó y apoyó. Siempre estuvieron ahí, apoyándome, impulsándome a seguir y no rendirme. Sin duda, no lo hubiese logrado sin el apoyo de ellos.

Gracias a mi mamá Cecilia por enseñarme a ser una mujer fuerte y resiliente; a mi papá Marcelo por siempre imaginar escenarios sobre cómo sería mi futuro, haciéndome más ambiciosa y ambos pidiéndome que los incluya. Gracias a mis hermanos Paulina, Felipe y Cecilia, que siempre se las arreglaban para llevarme a la universidad y esperarme horas en el estacionamiento con frío y mucho sol para que no tuviera que tomar el metro; y a mi Pelu, quien me acompañó durante muchas noches, así que creo que algo de ingeniería aprendió.

Gracias a mis amigos, Antonia, Rodrigo y Nicolás, por hacer la universidad más entretenida y brindarme su apoyo tanto académico como emocional. También agradezco a los amigos que hice durante la práctica profesional. Y finalmente, agradezco a mis profesores guías por darme la oportunidad de trabajar con ellos y guiar mi camino como ingeniera.

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
1.1	¿Qué son las tierras raras?	2
1.2	Reservas de tierras raras en el mundo	3
1.3	Aplicaciones de las tierras raras	4
1.4	Oportunidad.....	6
1.5	Objetivos	7
1.6	Alcance.....	7
2	Antecedentes generales	8
2.1	Minerales de tierras raras	8
2.2	Depósitos de minerales de tierras raras	9
2.3	Escenario mundial, REE como materias primas críticas.....	12
2.4	Tierras raras en Chile	13
3	Análisis estratégico	15
3.1	Análisis FODA.....	15
3.2	Análisis Cinco Fuerzas de Porter	16
3.3	Propuesta de estrategia	17
4	Metodología	18
5	Estudio de mercado	19
5.1	Bases del estudio de mercado.....	19
5.2	Necesidad del mercado.....	19
5.3	Producto	19
5.4	Propuesta de valor	19
5.5	Segmento donde existe la necesidad	19
5.6	Demanda.....	21
5.7	Oferta de tierras raras	22
5.8	Precio de mercado de Carbonatos de Tierras Raras	24
5.9	Tendencias del mercado de tierras raras	25
6	Estudio Técnico.....	26
6.1	Bases del Estudio Técnico.....	26
6.2	Proceso general	26
6.3	Remoción	26
6.4	Molienda.....	27
6.5	Beneficio	27
6.6	Hidrometalurgia	31
7	Análisis de Materias Primas	38
7.1	Definición de criterios	38
7.2	Resultados preliminares	39
7.3	Resultados	43
8	Diseño de proceso	45

8.1	Selección remoción relave	45
8.2	Molienda.....	46
8.3	Selección operaciones etapa de Beneficio	46
8.4	Selección operaciones para etapa de Hidrometalurgia.....	46
8.5	Descripción y etapas del proceso	47
8.6	Nivel de producción	48
8.7	Diagrama de procesos	50
8.8	Descripción del proceso	51
8.9	Listado de equipos.....	52
8.10	Balance de masa	53
8.11	Dimensionamiento equipos principales	55
9	Estimación de costos	56
9.1	Tasa de cambio.....	56
9.2	Estimación costos de inversión	56
9.3	Estimación costos de operación	59
10	Aspectos legales ambientales	64
10.1	Disposición residuos radioactivos	64
10.2	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)	64
10.3	Normativa aplicable a los relaves mineros en Chile	64
10.4	Normativas aplicables a las faenas mineras	65
11	Evaluación económica.....	65
11.1	Bases de la evaluación económica	65
11.2	Supuestos.....	66
11.3	Análisis económico	66
11.4	Resultados y análisis de casos	67
11.5	Análisis de sensibilidad.....	71
12	Conclusiones	74
13	Referencias	76
14	Anexos.....	82

Índice de Figuras

Figura 1: Países con mayores reservas de tierras raras en 2023.....	3
Figura 2: Concentraciones de ETR en la corteza terrestre.	10
Figura 3: Contenido promedio de tierras raras y de cobre en relaves de la minería del cobre.	14
Figura 4: Diagrama de cajas de producción de metales de tierras raras.....	7
Figura 5: Alcance del estudio.....	8
Figura 6: Proyección de la demanda de metales de tierras raras y MREC.	21
Figura 7: Cadena de suministro de tierras raras.	22
Figura 8: Producción minera mundial de REO's, de 1960 a 2012.....	23
Figura 9: Clasificación depósitos de relaves según humedad.	27
Figura 10: Diagrama de flujo de proceso de tostación con ácido sulfúrico.	33
Figura 11: Diagrama de flujo proceso de descomposición con hidróxido de sodio.	34
Figura 12: Diagrama de proceso del tratamiento ácido para la monacita.	35
Figura 13: Diagrama de proceso de tratamiento alcalino con soda cáustica para la monacita.	37
Figura 14: Ubicación minera Escondida y Puerto Coloso.	40
Figura 15: Depósito Cauquenes.	40
Figura 16: Depósito Los Leones.	41
Figura 17: Depósito Tranque N°4, Mina El Soldado.	42
Figura 18: Depósito Potrerillos, División Salvador Codelco.....	42
Figura 19: Ubicación planta desaladora respecto de mina El Soldado y Los Bronces.	44
Figura 20: Ubicación depósito de relaves.	45
Figura 21: Diagrama de procesos.....	50
Figura 22: Diagrama para balance de masa global	53
Figura 23: Distribución de costo por equipos.	58
Figura 24: Distribución de costos variables.	59
Figura 25: Distribución de costos fijos.	63
Figura 26: Flujo de caja caso 1.....	67
Figura 27: Flujo de caja caso 2.....	68
Figura 28: Flujo de caja caso 3.....	68
Figura 29: Flujo de caja caso 4.....	69
Figura 30: Flujo de caja caso 5.....	70
Figura 31: Sensibilidad de la Ley de Cobre en el VAN.....	71

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición de elementos en los relaves chilenos.	1
Tabla 2: Elementos de Tierras Raras.....	2
Tabla 3: Yacimientos más importantes de tierras raras en el mundo.....	4
Tabla 4: Usos de tierras raras.	5
Tabla 5: Usos de las tierras raras como facilitadores de procesos.	6
Tabla 6: Usos de las tierras raras como Bloques Tecnológicos.	6
Tabla 7: Principales minerales de mena de REE.....	9

Tabla 8: Lista de CRM en EE.UU ¹ , UE ² y Australia ³	13
Tabla 9: Producción mundial de REO's 2023 en kt.....	23
Tabla 10: Proyección de precios para metales de tierras raras.....	25
Tabla 11: Proyección de precios para MREC.....	25
Tabla 12: Gravedad específica y propiedades magnética de algunos minerales en relaves.....	29
Tabla 13: Resultados obtenidos luego de aplicado los criterios para selección de relaves.....	39
Tabla 14: Segunda matriz de selección de depósitos.....	43
Tabla 15: Especificaciones de interés depósitos ubicados en El Soldado.....	43
Tabla 16: Matriz de comparación tratamiento alcalino versus ácido.....	47
Tabla 17: Producción anual.....	48
Tabla 18: Producción en TPA por producto.....	49
Tabla 19: Resumen de corrientes de proceso.....	51
Tabla 20: Listado de equipos.....	53
Tabla 21: Porcentaje en peso de las especies de interés en la corriente de alimentación.....	54
Tabla 22: Balance de masa etapa remoción y molienda.....	55
Tabla 23: Balance de masa global etapa beneficio.....	55
Tabla 24: Balance de masa global etapa hidrometalurgia.....	55
Tabla 25: Dimensionamiento equipos principales.....	56
Tabla 26: Tasa de cambio.....	56
Tabla 27: Desglose de inversión de capital fijo (FCI).....	57
Tabla 28: Costo equipos comprados.....	58
Tabla 29: Resumen costos de inversión.....	58
Tabla 30: Costos variables anuales.....	60
Tabla 31: Razones técnicas servicios.....	60
Tabla 32: Consumo de energía por periodo.....	61
Tabla 33: Consumo de agua por año.....	61
Tabla 34: Razones técnicas de insumos.....	62
Tabla 35: Resumen costos fijos.....	62
Tabla 36: Costo por remuneraciones.....	63
Tabla 37: Indicadores económicos caso 1.....	67
Tabla 38: Indicadores económicos caso 3.....	68
Tabla 39: Indicadores económicos caso 4.....	69
Tabla 40: Indicadores económicos caso 5.....	70
Tabla 41: Beneficios económicos clientes caso 5.....	70
Tabla 42: Sensibilidad de la Ley de Cobre en el VAN en USD.....	71
Tabla 43: Sensibilidad de la inversión en el VAN en USD.....	72
Tabla 44: Sensibilidad de recuperación de cobre en el VAN USD.....	72
Tabla 45: Sensibilidad de la eficiencia de recuperación de tierras raras en el VAN.....	72
Tabla 46: Sensibilidad del costo de remoción en el VAN.....	73
Tabla 47: Sensibilidad del precio de la energía eléctrica en el VAN.....	73

Índice de Anexos

Anexo A: “Memoria de cálculo balance de masa etapa beneficio”	82
Anexo B: “Memoria de cálculo balance de masa etapa Hidrometalurgia”	84
Anexo C: “Cálculo de precio de carbonato mixto de tierras raras”	87

1 Introducción

La actividad minera en Chile es un pilar fundamental para la economía, tan solo el año 2023 aportó con un 14,6% al PIB (BCN, 2023). Sin embargo, esta actividad genera 800 millones de toneladas métricas de desechos mineros al año, conocidos como relaves, y se espera que se duplique para el año 2035, debido a la disminución de las leyes de los minerales y convirtiendo a Chile en uno de los mayores productores de relaves a nivel mundial (Cacciuttolo & Atencio, 2022).

Los relaves son una suspensión de sólidos en líquidos, que forman una pulpa, generada y desechada en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en un circuito de molienda fina (Ministerio de Minería, 2007). Estos constituyen un Pasivo Ambiental Mineros (PAM), los que, de acuerdo con BCN, se definen como: “Faenas mineras abandonadas o paralizadas; sus residuos incluidos, que constituyen un riesgo significativo para la vida, la salud de las personas y el medioambiente” (BCN, 2020)

En el marco de enfrentar los desafíos ambientales y sociales de la minería, el Servicio Nacional de Geología y Minería (en adelante Sernageomin) ha elaborado una base de datos con la información de todos los relaves catastrados del territorio nacional. Esta base incluye: composición química, masa total, ubicación, estado del tranque, entre otros (Sernageomin, 2023).

El catastro emitido el año 2023 determina que a lo largo de territorio nacional hay 764 relaves, de los cuales un 107 se encuentra activo (14%), 473 a inactivos (62%), 173 abandonados (23%) y 8 en construcción - revisión (1%). La composición de estos varía dependiendo del material de procesamiento (Sernageomin, 2023). No obstante, la caracterización geoquímica identifica 56 elementos clasificados en tres grupos presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de elementos en los relaves chilenos.

Fuente: (Sernageomin, 2023)

Grupo	Elementos/Minerales
Minerales rocosos	Óxido de: silicio SiO_2 , aluminio Al_2O_3 , titanio TiO_2 , hierro Fe_2O_3 , calcio CaO , magnesio MgO , manganeso MnO , sodio Na_2O , potasio K_2O , fósforo P_2O_5 , azufre SO_3 y compuestos perdidos por calcinación.
Metales, no metales y metaloides.	Cobre (Cu), vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), zinc (Zn), rubidio (Rb), estroncio (Sr), circonio (Zr) niobio (Nb), bario (Ba), plomo (Pb), cesio (Cs), hafnio (Hf), tantalio (Ta), arsénico (As), escandio (Sc), itrio (Y), molibdeno (Mo), antimonio (Sb), estaño (Sn), torio (Th), plata (Ag), cadmio (Cd), bismuto (Bi), wolframio (W), uranio (U), oro (Au), y mercurio (Hg).
Tierras raras	Lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb), y lutecio (Lu).

En términos generales, los elementos formadores de roca representan aproximadamente el 99,06% de la masa de los relaves, mientras que los metales, no metales y metaloides constituyen un 0,82%, y las tierras raras un 0,01%. Entre los metales, destaca la presencia de cobre, con leyes promedio

de 0,2–0,6% en relaves antiguos, mientras que en los depósitos más recientes este promedio disminuye a 0,1% debido a la mayor eficiencia de los procesos actuales (Cacciuttolo & Atencio, 2022). Aunque la concentración de cobre es significativamente más alta, también resalta la presencia de tierras raras, aunque en menor proporción.

1.1 ¿Qué son las tierras raras?

Los Elementos de Tierras Raras (ETR), en inglés *REE: Rare Earth Elements*, presentados en la Tabla 2, corresponden a un grupo 17 elementos metálicos con propiedades químicas similares de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (Lantano hasta Lutecio) y los otros dos corresponden al Itrio (Y) y el Escandio (Sc), los cuales se agregan debido a sus similitudes fisicoquímicas con los lantánidos y se encuentran en los mismos yacimientos. Todos los elementos se encuentran en la naturaleza menos el elemento Prometio (Pm), ya que se produce artificialmente como subproducto de las reacciones de fisión de uranio. Sin embargo, se han detectado cantidades mínimas de prometio en la naturaleza y se debe a que este elemento no tiene isótopos estables. (COCHILCO, 2016).

Tabla 2: Elementos de Tierras Raras.
Fuente: (Gupta & Krishnamurthy, 2005)

Nombre	Símbolo Químico	No Atómico	Valencia	Configuración Electrónica
Escandio	Sc	21	+3	$[Ar]3d^14s^2$
Itrio	Y	39	+3	$[Kr]4d^15s^2$
Lantano	La	57	+3	$5d^16s^2$
Cerio	Ce	58	+3,+4	$4f^15d^16s^2$
Praseodimio	Pr	59	+3	$4f^36s^2$
Neodimio	Nd	60	+3	$4f^46s^2$
Prometio	Pm	61	+3	$4f^56s^2$
Samario	Sm	62	+2, +3	$4f^66s^2$
Europio	Eu	63	+2, +3	$4f^76s^2$
Gadolinio	Gd	64	+3	$5f^75d^16s^2$
Terbio	Tb	65	+3	$4f^96s^2$
Disprosio	Dy	66	+3	$4f^{10}6s^2$
Holmio	Ho	67	+3	$4f^{11}6s^2$
Erbio	Er	68	+3	$4f^{12}6s^2$
Tulio	Tm	69	+2, +3	$4f^{13}6s^2$
Iterbio	Yb	70	+2, +3	$4f^{14}6s^2$
Lutecio	Lu	71	+3	$4f^{14}5d^16s^2$

Los ETR se dividen en dos grupos basado en sus propiedades.

- Tierras Raras Livianas (*LREE: Light REE*) o también llamadas grupo del Cerio, considera los elementos desde el Lantano hasta Europio (Gupta & Krishnamurthy, 2005) y se

caracterizan porque a medida que se añaden electrones a los niveles 4f el número de electrones 4f desapareados aumenta (McNulty & et al., 2022).

- Tierras Raras Pesadas (*HREE: Heavy REE*) o grupo del Itrio, considera desde el Gadolinio hasta Lutecio más el Itrio y Escandio (Gupta & Krishnamurthy, 2005) y se caracterizan porque experimentan disminuciones de electrones 4f desapareados (McNulty & et al., 2022).

Una característica común de los ETR, es que todos ellos suelen encontrarse como iones trivalentes, es decir, con valencia +3. Sin embargo, otros elementos como Cerio, Samario, Europio, Tulio y Terbio también pueden presentar una valencia +4. Esta similitud en sus estados de oxidación permite que los ETR se sustituyan entre sí en diversas redes cristalinas, lo que explica la presencia de múltiples ETR en un mismo mineral. (ISE, 2024)

1.2 Reservas de tierras raras en el mundo

Los depósitos de minerales de tierras raras se encuentran en todo el mundo. Sin embargo, los yacimientos más importantes se encuentran en China, Estados Unidos y Australia. De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), China cuenta con las mayores reservas de tierras raras en el mundo con un volumen de 44 millones de toneladas métricas de óxidos de tierras raras representando un 39% a nivel mundial, le sigue Vietnam y Brasil y en conjunto los tres países representan más del 70% de las reservas mundiales (USGS, 2024). Ver Figura 1.

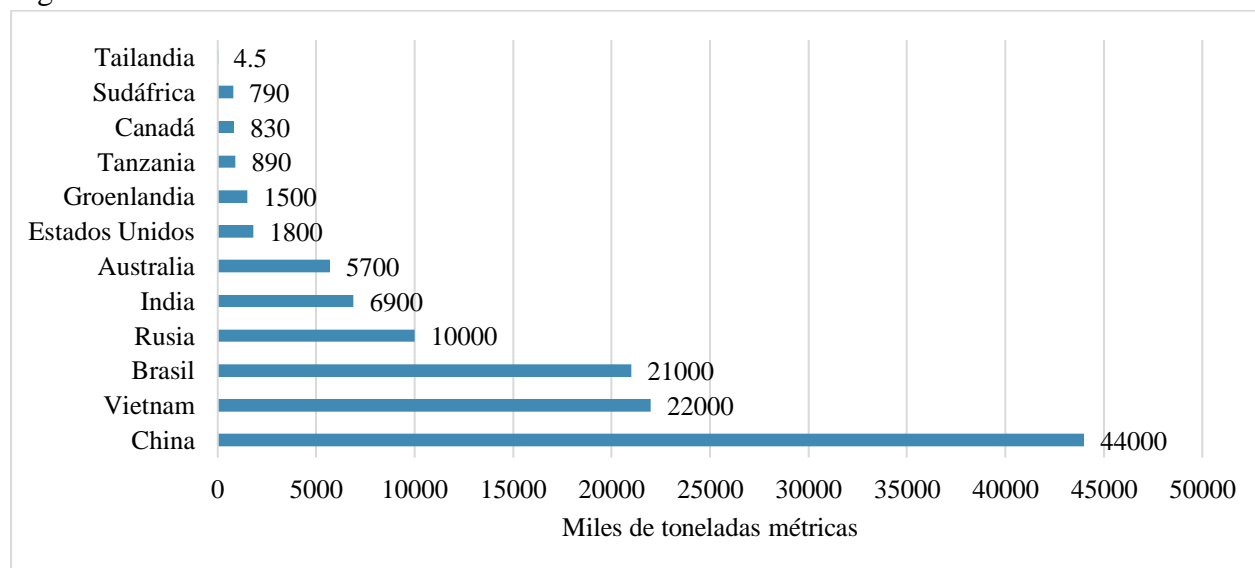


Figura 1: Países con mayores reservas de tierras raras en 2023.

Fuente: Elaborado en base a datos de USGS (USGS, 2024).

En China se encuentra el yacimiento Bayan Obo en la Región de Mongolia, el más grande de tierras raras en el mundo, con un volumen reportado de 800 millones de toneladas métricas. Y de acuerdo con la USGS, en este yacimiento se encuentra el 83% de las reservas Chinas (USGS, 2024).

En Estados Unidos se encuentra el yacimiento Mountain Pass, que al igual que China posee una alta concentración de bastnasita (Haque, Hughes, Lim, & Vernon, 2014). Con un volumen de 16,7

millones de toneladas métricas, es decir, cuarenta y siete veces más pequeño que el yacimiento de China. En Australia se encuentra el yacimiento Mount Weld operado por Lynas Corporation, se encuentra principalmente compuesto de monacita (USGS, 2023). Otros yacimientos alrededor del mundo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Yacimientos más importantes de tierras raras en el mundo.

Fuente: (Dushyantha N. e., 2020)

Yacimiento	Ubicación	Tierras raras principales
Bayan Obo	China	La, Ce, Nd
Mountain Pass	Estados Unidos	LREE
Mount Weld	Australia	LREE
Illimaussaq	Dinamarca	La, Ce, Nd, HREE
Pilanesberg	Sudáfrica	Ce, La
Steenkampskraal	Sudáfrica	La, Ce, Nd
Hoidas Lake	Canadá	La, Ce, Pr, Nd
Thor Lake	Canadá	La, Ce, Pr, Nd, HREE
Strange Lake and Misery Lake Nolans Bore	Canadá	La, Ce, Nd, HREE
Nolans Bore	Australia	La, Ce, Nd
Norra Kärr	Suecia	La, Ce, Nd, HREE
Khibina y Lovzenzero	Rusia	LREE, HREE
Nkwombwa Hill	Zambia	LREE
Tundulu	Malawi	LREE
Kagankunde	Malawi	LREE
Songwe	Malawi	LREE, Nd
Depósitos chinos de adsorción de iones	China	La, Nd, HREE
Maoniuping	China	LREE
Dong Pao	Vietnam	LREE

1.3 Aplicaciones de las tierras raras

Las tierras raras tienen diversas aplicaciones, siendo clave en tecnologías modernas, especialmente en la fabricación de imanes. El neodimio y el disprosio son las tierras raras más importantes en este campo, permiten la producción de imanes más potentes y compactos. Al combinarse con otros elementos, como el hierro y el boro, se forman imanes de NdFeB, que son algunos de los más fuertes de la industria. Los motores eléctricos y generadores que utilizan imanes de tierras raras son los más eficientes energéticamente, logrando ahorros de energía de aproximadamente un 20-40% (IEA, 2024). En la Tabla 4 se encuentra de forma detallada todos los usos de cada tierra rara.

Tabla 4: Usos de tierras raras.

Fuente: (Centro de Ciencias Costeras y Marinas del Pacífico, 2024)

Elemento	Usos de metales de tierras raras
Escandio	Superalcaciones, componentes aeroespaciales ultraligeros, tubos de rayos X, bates de béisbol , luces, semiconductores
Itrio	Cerámica, aleaciones metálicas, baterías recargables, fósforos de TV, superconductores de alta temperatura
Lantano	Baterías, vidrio óptico, lentes de cámara, catalizadores de refinación de petróleo
Cerio	Catalizadores, aleaciones metálicas, protección contra la radiación, purificador de agua
Praseodimio	Imanes, láseres, pigmentos, refrigerante criogénico
Neodimio	Imanes permanentes de alta resistencia, láseres, filtros infrarrojos, unidades de disco duro
Samario	Imanes de alta temperatura, varillas de control y blindaje de reactores nucleares, láseres, filtros de microondas
Europio	Pantallas de cristal líquido, iluminación fluorescente, fósforos rojos y azules
Gadolinio	Agente de contraste de resonancia magnética, chips de memoria, blindaje de reactores nucleares, discos compactos
Terbio	Fósforos verdes, láseres, lámparas fluorescentes, memorias ópticas de ordenador
Disprobio	Imanes permanentes, láseres, catalizadores, reactores nucleares
Holmio	Láseres, reactores nucleares, catalizadores, imanes
Erbio	Láseres, acero al vanadio, gafas de absorción de infrarrojos, fibras ópticas
Tulio	Máquinas de rayos X portátiles, microondas,
Iterbio	Láseres infrarrojos, agente reductor químico, baterías recargables, fibra óptica
Lutecio	Detectores de escaneo PET, superconductores, vidrio de alto índice de refracción, fósforo de rayos X

Otra forma de clasificar el uso de las tierras raras es si estas se utilizan para mejorar procesos industriales, denominados “Facilitadores de Procesos”, y construir tecnologías modernas, denominados “*Building Blocks*” (Hatch, 2012), presentados en las Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Tabla 5: Usos de las tierras raras como facilitadores de procesos.

Fuente: (Hatch, 2012)

Uso	Descripción
Catalizadores de cracking fluido (FCC):	Son materiales usados en la refinación de petróleo. Se agrega lantano (La) y cerio (Ce) a estos compuestos catalíticos (hasta un 8% en peso), mejorando la actividad catalítica y la selectividad del proceso.
Convertidores catalíticos automotrices:	El óxido de cerio (CeO_2) es el principal compuesto de tierras raras en los convertidores catalíticos y se emplea en un recubrimiento, junto con zirconio (Zr) y metales del grupo del platino. Las tierras raras facilitan reacciones redox que transforman NOx, CO e hidrocarburos no quemados en compuestos menos perjudiciales.
Medios de pulido:	Grandes cantidades de CeO_2 se utilizan para pulir vidrio, espejos, pantallas de TV, monitores de computadora y las obleas para producir chips de silicio. El CeO_2 permite pulir la superficie hasta obtener un acabado de alta calidad.

Tabla 6: Usos de las tierras raras como Bloques Tecnológicos.

Fuente: (Hatch, 2012)

Uso	Descripción
Imanes permanentes	Las tierras raras en aleaciones magnéticas (con un 30–35% en peso de REEs) permiten crear imanes con campos magnéticos muy fuertes y alta resistencia a la desmagnetización. Los elementos de tierras raras ligero, como neodimio, praseodimio y samario, mejoran el ferromagnetismo en metales de transición como hierro y cobalto. Estas propiedades han revolucionado el diseño de motores eléctricos y generadores de alto rendimiento, como los de vehículos híbridos y turbinas eólicas de alta potencia.
Almacenamiento de energía:	Compuestos de lantano y níquel se utilizan en celdas de baterías recargables, donde el lantano facilita la absorción de hidrógeno y permite una reversión eficiente del proceso electroquímico
Fósforos	Los materiales de fósforo emiten luz al ser expuestos a electrones o radiación UV y se usan en pantallas LCD, LEDs, lámparas fluorescentes compactas (CFLs), entre otros. El europio, itrio y terbio se emplean para ajustar la emisión de color específica en cada aplicación.

1.4 Oportunidad

Chile enfrenta el desafío de gestionar grandes volúmenes de relaves, los cuales seguirán aumentando. Este proyecto identifica la oportunidad de reprocesar los relaves mineros para extraer tierras raras y cobre, agregando valor al utilizar residuos mineros como materia prima. De esta forma, promueve la sostenibilidad mediante la adopción de principios de la economía circular. Esto constituye una ventaja competitiva clave del proyecto.

La propuesta incluye la evaluación técnica y económica de una planta de procesamiento de relaves bajo un contrato tipo maquila, donde se ofrece un servicio de procesamiento y los productos finales, cobre y tierras raras, permanecen como propiedad del dueño del relave, integrándose a su cadena de producción.

Los beneficios para la empresa maquiladora, en este caso el proyecto, provienen de una tarifa de venta de los productos al cliente. Y los beneficios para el cliente serán el margen entre el precio de mercado y la tarifa de venta del producto.

Otras ventajas de esta solución incluyen que, al procesar arena en lugar de roca dura, no es necesaria la etapa de chancado, y la molienda puede realizarse a menor intensidad, lo que reduce los costos. Además, la extracción de tierras raras podría impulsar la creación de un nuevo mercado de metales en Chile.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnico-económica de un proceso para la producción de tierras raras desde tranques de relave en Chile con enfoque polimetálico.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar el mercado de las tierras raras.
- Selección de la tecnología más adecuada para el proceso.
- Análisis de las materias primas para la selección de un depósito.
- Diseñar un proceso para el procesamiento de relaves según el depósito seleccionado.
- Evaluar los impactos ambientales principales del procesamiento de relaves.
- Determinar los aspectos legales del proyecto.
- Análisis económico de la propuesta de proceso.

1.6 Alcance

La producción de metales de tierras raras implica una serie de etapas de procesamiento que se pueden resumir en seis etapas principales, presentadas a continuación:



Figura 2: Diagrama de cajas de producción de metales de tierras raras.

Dentro de este proceso la hidrometalurgia permite obtener un producto intermedio conocido como carbonato de tierras raras o concentrado de tierras raras, que es comercializable en el mercado.

Dado que la producción de metales de tierras raras requiere una infraestructura compleja y especializada, el alcance de este trabajo se enfoca exclusivamente en la producción de carbonato de tierras raras. Por lo tanto, se diseñará un proceso específico para la obtención de mezclas de carbonatos de tierras raras a partir de relaves mineros.

Es importante señalar que la etapa de minería no forma parte de este alcance, ya que el proceso se basa en el procesamiento de relaves mineros como materia prima. Por lo tanto el alcance de este estudio queda como se observa en la Figura 3.

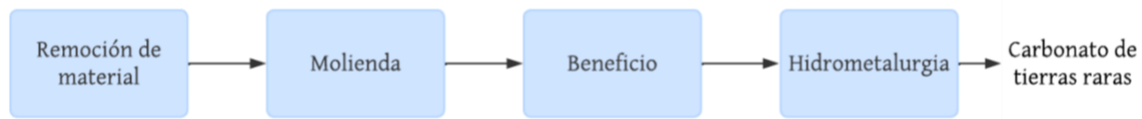


Figura 3: Alcance del estudio.

2 Antecedentes generales

En esta sección tiene como objetivo proporcionar una comprensión integral sobre las tierras raras, necesaria para contextualizar y entender secciones posteriores. Se presentan los minerales que contienen tierras raras y los depósitos donde se encuentran. Además, se da a conocer la importancia estratégica de estos elementos a nivel internacional y su clasificación como materias primas críticas. Finalmente, se describe el escenario chileno, incluyendo estudios realizados y el potencial identificado en la región sur del país.

2.1 Minerales de tierras raras

En la naturaleza, las tierras raras no se encuentran en estado elemental ni como compuestos individuales de tierras raras. Estas se encuentran en la composición de minerales como haluros, carbonatos, óxidos, fosfatos y silicatos (Sadri, Nazari, & Ghahreman, 2017) y se encuentran en más de 250 minerales. Sin embargo, alrededor del 95% de todos los recursos de tierras raras del mundo se encuentran en solo dos minerales: la bastnasita y monacita (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Otros minerales también importantes para la explotación económica se presentan a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7: Principales minerales de mena de REE.

Fuente: (COCHILCO, 2016)

Grupo	Mineral	Formula Química
Carbonatos	Bastnasita	$(Ce, La, Pr)(CO_3)F$
	Parisita	$Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$
	Cebaita	$Ba_3(Ce, Nd)_2(CO_3)_5F_2$
	Huanghoita	$Ba(Ce, La, Nb)_2(CO_3)_2F$
Fosfatos	Monacita	$(Ce, La, Nd, Th)PO_4$
	Xenomita	YPO_4
	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
Silicatos	Cerita	$(Ce, Ca)_9(Mg, Fe)(SiO_4)_3(HSiO_4)_4(OH)_3$
	Gadolinita	$(Ce, La, Nd, Y)_2FeBe_2[OSiO_2]_2$
	Allanita	$(Ca, Ln)_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$
Óxidos	Euxenita	$(Ln, Ca, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
	Loparita	$(Na, Ce, Ca, Sr, Th)(Ti, Nb, Fe)O_3$

2.1.1 Bastnasita

El mineral bastnasita es un fluorocarbonato que en su composición contiene cerio, lantano y praseodimio y neodimio, también contiene torio, elemento radioactivo pero bajas concentraciones. Contiene aproximadamente un 70% de Óxidos de Tierras Raras (REO: *Rare Elements Oxidans*), en su mayoría LREE. La bastnasita es el mineral principal del depósito de Bayan Obo en China y en Mountain Pass, California en los EE.UU. Su concentración se reporta como óxidos para facilitar la comparación entre yacimientos y porque los óxidos son los precursores de los metales en la cadena de producción (Gupta & Krishnamurthy, 2005)

2.1.2 Monacita

El mineral monacita es un mineral fosfato y al igual que la bastnasita contiene cerio, lantano, neodimio, praseodimio y elementos radiactivos como torio y uranio. La concentración de tierras raras y de elementos radioactivos en la monacita varía según el tipo de depósito y su ubicación. Sin embargo, por lo general la monacita contiene un 70% aproximadamente de REO's (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Algunos de los yacimientos donde se encuentra la monacita son: Van Rhynsdorp y Naboomspruit, Sudáfrica; Colorado, Estados Unidos; y en Bayan Obo, China. (Gupta & Krishnamurthy, 2005)

2.2 Depósitos de minerales de tierras raras

La palabra "raras" en "tierras raras" surge de la dificultad histórica para separarlas y obtenerlas como elementos puros individuales, no de su abundancia en la naturaleza (COCHILCO, 2016). En algunos casos las tierras raras son más abundantes que otros metales comerciales. Por ejemplo, el Oro tiene una concentración de aproximadamente de 0,01 ppm, Figura 4, mientras que el Cerio tiene una concentración 100 veces mayor. El problema de las tierras raras es que son poco comunes

los yacimientos con altas concentraciones para que su extracción y producción sean económicamente rentable.

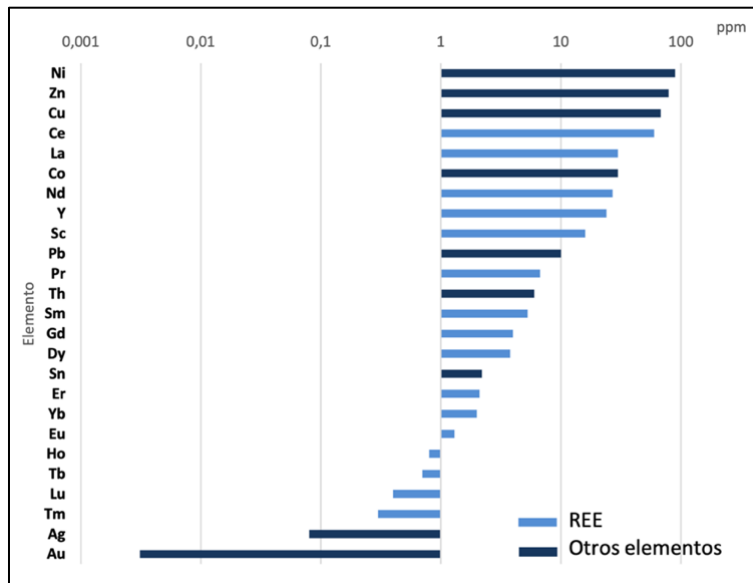


Figura 4: Concentraciones de ETR en la corteza terrestre.

Fuente: (COCHILCO, 2016)

Además, la ocurrencia de las tierras raras, se caracteriza por seguir la regla de Oddo-Harkins, es decir, los elementos químicos con números atómicos pares son más abundante que los con número atómico impar (Pavez I. , 2020).

Los minerales de tierras raras se encuentran en depósitos geológicos en todo el mundo, los cuales varía su origen de formación y composición. Los depósitos se califican en dos:

- i. Depósitos primarios: corresponden a los depósitos formados por procesos magmáticos, hidrotermales y/o metamórficos. En estos depósitos se asocian rocas ígneas como carbonatitas, rocas ígneas alcalinas, pegmatitas, depósitos de cobre-oro con óxido de hierro, y depósitos de venas y skarn. Donde las carbonatitas y las rocas alcalinas son algunos de los recursos más importantes para la extracción de tierras raras (Balaram V. , 2023).
- ii. Depósitos secundarios: son aquellos formados por la redistribución o transporte sedimentario de materiales provenientes de depósitos primarios. Los más importantes son las lateritas, arcillas de adsorción iónica, bauxitas de alto y bajo grado y los depósitos de placer.

2.2.1 Depósitos primarios

2.2.1.1 Carbonatitas

Las rocas ígneas derivadas de magmas ricos en carbonatos y constituyen una fuente importante de tierras raras (COCHILCO, 2016). Estas rocas son reconocidas como las más relevantes para la extracción de tierras raras debido a su concentración de elementos de (Gupta & Krishnamurthy, 2005). En este tipo de depósitos, los principales minerales portadores de LREE, son la bastnasita, parisita, sinquisita, ancilita y monacita (USGS, 2023).

2.2.1.2 Rocas ígneas alcalinas

Las rocas ígneas alcalinas se forman a partir de la cristalización de magmas de silicato y fluidos enriquecidos en elementos alcalinos (COCHILCO, 2016) y precipitan minerales que contienen tierras raras, mayoritariamente HREE y otros elementos como Zr, Nb, Sr, Ba y Li (Balaram V. , 2019). Estos depósitos se encuentran en los yacimientos de Mountain Pass, California; Bayan Obo de China; e Ytterby, Suecia (Balaram V. , 2019).

2.2.1.3 Pegmatitas

Las pegmatitas son un grupo de rocas ígneas de grano muy grueso (COCHILCO, 2016). En estos depósitos se encuentra la monacita y la allanita y tienden a tener mayor concentración de HREE, en comparación a otros depósitos. También, el contenido total de tierras raras disminuye y aumenta la concentración de torio (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Estos depósitos no han sido explotados para extracción de tierras raras, pero sí de otros minerales industriales como el feldespato. (COCHILCO, 2016)

2.2.1.4 Depósitos de óxidos de hierro

Estos depósitos se subdividen en dos grupos: óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG: Iron Oxide Copper Gold deposit) y magnetita apatito (IOA: Iron Oxide Apatit) (COCHILCO, 2016). Estos depósitos se forman por la meteorización profunda de rocas ígneas (principalmente granito), pegmatitas, depósitos de óxido de hierro, cobre y oro (Balaram V. , 2019). Depósitos IOCG en el mundo son: Olympic Dam en Australia; Bayan Obo en China, Candelaria y Mantoverde en Chile. Y depósitos de IOA se encuentran en: Kiruna en Suecia y Romeral, Algarrobo y Los Colorados en Chile (COCHILCO, 2016).

2.2.2 Depósitos secundarios

2.2.2.1 Arcillas iónicas

Las arcillas iónicas son depósitos de bajas concentraciones de tierras raras (0,04-0,25%) (COCHILCO, 2016) y se forman a partir de la erosión y meteorización de rocas alcalinas y pegmatitas. Contienen iones de tierras raras que puede ser intercambiados fácilmente con otros cationes (McNulty & et al., 2022). Y se consideran una fuente importante de HREE (Sadri, Nazari, & Ghahreman, 2017). La mayoría de estos yacimiento que son explotados económicamente se encuentran en las provincias de Jiangxi, Hunan, Fujian, Guangdong, Guangxi, Yunnan, Zhejiang y Hainan en el sur de China (Sobri, Yunus, & Harun, 2023). Este depósito abastece más del 95% de la demanda global de tierras raras (Balaram V., 2023).

2.2.2.2 Lateritas

Se originan de la intensa meteorización laterítica de las rocas ígneas en condiciones tropicales, lo que produce una variedad de depósitos secundarios, como bauxitas, hematita, goetita, arenas de titanio y REE. Estas arcillas de adsorción iónica son muy adecuadas para la minería mediante lixiviación in situ, un proceso menos invasivo (Balaram V., 2023).

2.2.3 Depósitos alternativos

Los depósitos secundarios y primarios no son suficientes para cubrir la creciente demanda de las tierras raras. Por lo tanto, se han investigado nuevas fuentes que puedan contribuir a la oferta mundial. Entre estas fuentes se encuentran los residuos industriales, como los generados en la minería. El caso de procesamiento de minerales como bauxita, aluminio o fosfato y produce lodos rojos, fosfoyeso (sub producto de la producción de fertilizantes partir de fosfatos) y escorias con importantes cantidades de tierras raras (Balaram V., 2023).

También, la extracción de minerales está asociada a la formación de drenajes ácidos. El Drenaje Ácido de Minas (AMD: Acid Mine Drainage) se produce cuando el material que contiene sulfuro se expone al oxígeno y al agua (Akciil & Koldas, 2006).

Por último, se encuentra el reciclaje de desechos electrónicos, tales como, imanes, baterías de níquel-hidruro metálicos, discos duros, entre otros. Cada año, se generan más de 50 millones de toneladas de residuos electrónicos en todo el mundo, y estos contienen metales valiosos como REE, cobre, cobalto, litio, entre otros. Sin embargo, uno de los principales desafíos en el reciclaje de REE es la baja concentración de estos metales en los dispositivos electrónicos, lo que dificulta su recuperación eficiente y rentable (Balaram V., 2023).

2.3 Escenario mundial, REE como materias primas críticas

Dada la importancia de los usos y aplicaciones de las tierras raras, así como su distribución geográfica, países como Estados Unidos, Australia y la Unión Europea las incluyen a en sus listas de materias primas críticas (CRM: *Critical Raw Materials*).

Estas listas tienen como objetivo identificar y gestionar aquellas materias primas que son fundamentales para la economía, seguridad y el desarrollo tecnológico. Sin embargo, la definición de "materias primas críticas" varía de un país a otro, dependiendo de la necesidad de un elemento en un momento dado y de otros criterios como el riesgo de suministro, las implicaciones ambientales, la vulnerabilidad a restricciones de suministro, entre otros. Por ejemplo, aunque el cobre es un metal crítico para el desarrollo económico, su suministro no se considera en riesgo, ya que muchos países son productores de este metal, lo que explica por qué no está incluido en estas listas. (Kumar & et al, 2021)

En Estados Unidos la Ley de Energía 2020 (Oficina de Comunicaciones y Publicaciones (OCAP), 2022) se define como "Un mineral o material mineral no combustible que es esencial para la seguridad económica o nacional de Estados Unidos y cuya cadena de suministro es vulnerable a interrupciones. Los minerales críticos también se caracterizan por cumplir una función esencial en la fabricación de un producto, cuya ausencia tendría consecuencias significativas para la economía o la seguridad nacional."

La Unión Europea (Consejo Europeo, 2024) define las CRM como "materias primas de gran importancia para la economía de la UE, con un alto riesgo de interrupción del suministro debido a su concentración de fuentes y a la falta de sustituto buenos y asequibles"

De manera similar, Geoscience Australia (Geoscience Australia, 2024) define los minerales críticos como "un elemento metálico o no metálico que tiene dos características: (i) Es esencial para el

funcionamiento de nuestras tecnologías modernas, economías o seguridad nacional y (ii) Existe el riesgo de que sus cadenas de suministro se vean interrumpidas.”

Tabla 8: Lista de CRM en EE.UU¹, UE² y Australia³.

Fuente:¹ (Oficina de Comunicaciones y Publicaciones (OCAP), 2022), ² (Comisión Europea, 2023), ³ (Geoscience Australia, 2024).

País/organización mundial	Materias primas críticas
Estados Unidos	Aluminio, Antimonio, Arsénico. Baritina, Berilio, Bismuto. Cesio, Cromo, Cobalto. Elementos de tierras raras. Fluorita. Galio, Germanio, Grafito (natural). Hafnio, Helio. Indio. Litio. Magnesio, Manganeso. Níquel, Niobio. PGM ¹ . Rubidio. Estroncio, Tantalio, Telurio, Estaño, Titanio, Tungsteno. Vanadio, Zinc. Circonio.
Unión Europea	Antimonio, Arsénico. Barita, Bauxita, Berilio, Bismuto, Borato. Carbón, Cobalto. Elementos de tierras raras. Feldespato, Fluorita. Galio, Germanio, Grafito Natural. Hafnio, Helio. Litio. Magnesio, Manganeso. Niobio. PGM ³ , Roca fosfórica, Fósforo. Escandio, Silicio metal, Estroncio Tántalo, Metal de Titanio, Tungsteno. Vanadio
Australia	Aluminio de Alta pureza, Antimonio, Arsénico. Berilio, Bismuto. Cromo, Cobalto. Elementos de Tierras Raras. Flúor ¹² . Galio, Germanio, Grafito ¹³ . Hafnio. Indio. Litio. Magnesio, Manganeso, Molibdeno. Níquel, Niobio. PGM ¹ . Renio. Selenio, Silicio. Tántalo, Telurio, Titanio, Tungsteno. Vanadio. Circonio

³PMG: Metales del grupo del platino. Considera los elementos: paladio, platino, iridio, rodio y rutenio.

2.4 Tierras raras en Chile

2.4.1 Proyecto realizado por Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) junto con la Empresa Nacional de Minería (Enami)

En Chile entre los años 1995 y 2003 la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) junto con la Empresa Nacional de Minería (Enami) realizaron el proyecto titulado “Investigación Geológica de la presencia de Elementos de Tierras Raras, Cordillera de la Costa, regiones III y IV” que buscaba prospectar, definir y explorar preliminarmente prospectos de tierras raras, establecer propiedad minera en los prospectos definidos a nombre de Enami y CCHEN, y, por otra parte, desarrollar técnicas metalúrgicas para obtener un concentrado comercial de óxidos de tierras raras mediante la aplicación de técnicas hidrometalúrgicas. El proyecto logró varias metas, sin embargo, no se finalizó principalmente por falta de recursos financieros (CORFO, 2013).

2.4.2 Estudio Cámara Chilena Alemana (Camchal)

La Camchal realizó un estudio en el que se tomaron muestras de relaves proveniente de plantas concentradores de cobre. Del estudio destacan el Tranque Carola (Compañía Minera Carola) con un promedio de 525 ppm de tierras raras, la Planta Vallenar con 370 ppm, y el Tranque El Salado con 350 ppm, Figura 5 (COCHILCO, 2016).

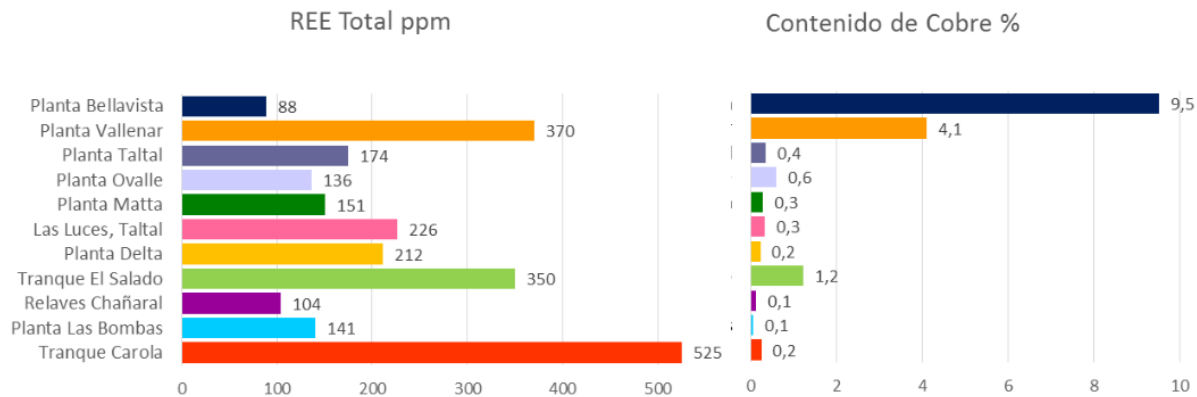


Figura 5: Contenido promedio de tierras raras y de cobre en relaves de la minería del cobre.

Fuente: (COCHILCO, 2016).

Aunque existan concentraciones de tierras raras que potencialmente puedan ser extraídas, la viabilidad económica de reprocesar relaves depende en gran medida del contenido de cobre, ya que este es el metal con mayor valor económico.

2.4.3 Depósitos de óxidos de hierro-apatito

Como se mencionó en la sección 2.2.1.4, en Chile, específicamente en la Franja de Hierro Chilena, existen depósitos de óxidos de hierro - apatito, que poseen magnetita y menor medida apatito. Los prospectos más reconocidos son: El Romeral, Algarrobo, Los Colorados, Cerro Carmen, Cerro Imán y Cerro Negro. Estos yacimientos no se han explorado debido a su baja ley comparada con el yacimiento de Bayan Obo, no siendo viable económicamente, y porque aún no existe una tecnología competitiva para su procesamiento (Cifuentes, 2019).

2.4.4 Módulo Penco

En la comuna de Penco, Región del Bío Bío hay yacimiento de arcillas iónicas. La empresa Biolantánidos desarrolló un proyecto para la extracción de tierras raras. Sin embargo, actualmente el proyecto está a cargo de la empresa Aclara Resources bajo el nombre Módulo Penco.

De acuerdo con el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) publicado en el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), la planta está diseñada con una capacidad para procesar hasta 320 toneladas/hora de material y producir aproximadamente 1.700 toneladas anuales de concentrado de Tierras Raras (SEIA, 2023).

En julio de 2023, meses después de haber sido ingresado el estudio al SEIA, el representante decide poner término anticipado al procedimiento de evaluación del EIA del proyecto, conforme a lo dispuesto en el artículo 15 bis de la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y en el artículo 36 del Reglamento del SEIA, por los fundamentos señalados en los Considerandos N° 13 y 14 de la resolución, los cuales indican que el estudio proyecto carece de información esencial, ya que no reconoce algunos de los efectos que generan la necesidad de presentar un EIA y no presenta los antecedentes que permitan evaluar si el proyecto genera o presenta efectos adversos significativos debido a la localización y valor ambiental del territorio, respectivamente (SEIA, 2023).

Y en junio de 2024, Aclara anuncia el ingreso del EIA al SEA, que aborda las observaciones relacionadas con los requisitos ambientales y sociales del estudio anterior (Aclara, 2024).

3 Análisis estratégico

Para evaluar la viabilidad de la producción de tierras raras en Chile, se deben analizar tanto los factores internos como externos que pueden influir en el éxito del proyecto. Para ellos se utilizarán las herramientas: FODA, que identificará las principales fortalezas y debilidades del proyecto, así como las oportunidades y amenazas del entorno; y el análisis de las cinco fuerzas de Porter, que permitirá conocer las dinámicas competitivas en el mercado de tierras raras.

3.1 Análisis FODA

3.1.1 Fortalezas

- **Modelo de negocios:** la maquila reduce el riesgo de fluctuaciones de precios, ya que en los contratos se establecen las tarifas, no dependiendo de forma directa del mercado.
- **Enfoque de sostenibilidad:** el procesamiento de relaves revaloriza pasivos ambientales en lugar de extraer nuevos minerales, lo que implica un menor impacto ambiental al reducir la necesidad de explotar nuevos yacimientos. Además, el proyecto genera beneficios sociales, como la generación nuevos empleos, contribuyendo al desarrollo económico local y mejorando la aceptación social del proyecto.
- **Reducción de costos operativos:** utilizar relaves como materia prima genera ahorros significativos de recursos y energía, dado que los relaves ya fueron sometidos a proceso de molienda. Este ahorro de energía, junto con una menor inversión en equipos de procesamiento primario, puede mejorar sustancialmente la rentabilidad del proyecto, aumentando su competitividad en el mercado.

3.1.2 Oportunidades

- **Aumento en la demanda de tierras raras:** dado los avances tecnológicos de grandes economías, como Estados Unidos y la unión Europea, es que se busca asegurar el suministro de estos minerales críticos, representando una oportunidad para nuevos productores.
- **Diversificación de proveedores de tierras raras:** en la actualidad el mercado de tierras raras está controlado por China, puesto que posee la mayor parte de las reservas y la producción global. Esto genera una gran dependencia de las economías mundiales en un solo proveedor, lo que ha motivado a muchas naciones a buscar alternativas para garantizar el suministro de estos recursos críticos. En este contexto, Chile tiene una oportunidad estratégica para ingresar al mercado como un nuevo proveedor confiable, diversificando la oferta y reduciendo los riesgos asociados a la concentración del mercado.
- **Políticas Chilenas:** el Ministerio de Minería desarrolló una Política Nacional Minera 2050 (PNM 2050), que busca responder a los tres pilares de la sostenibilidad (Chile Agenda 2030, 2024). Este marco regulatorio puede facilitar proyectos que estén orientados en el mismo eje.

- **Avances tecnológicos:** el inicio de procesamiento de minerales para la extracción de tierras raras en Chile puede motivar proyectos de innovación e incentivar iniciativas gubernamentales para el apoyo en la innovación.

3.1.3 Debilidades

- **Desafíos Técnicos:** el procesamiento de relaves puede enfrentar dificultades técnicas y operativas, como la gestión de residuos y la eficiencia en la extracción.
- **Falta de experiencia en la industria de tierras raras en Chile:** Chile tiene una vasta experiencia en minería del cobre, pero la industria de tierras raras es nueva, a pesar de que se usan los mismos principios físico químicos. Esto puede generar desafíos en términos de personal capacitado, infraestructura adecuada y el desarrollo de técnicas específicas para su extracción y procesamiento.

3.1.4 Amenazas

- **Competencia internacional:** a pesar de las oportunidades que surgen por la diversificación del mercado, China tiene ventajas establecidas en cuanto a infraestructura, costos y experiencia.

3.2 Análisis Cinco Fuerzas de Porter

3.2.1 Rivalidad de los competidores actuales

Los competidores corresponden a empresas consolidadas que extraen tierras raras desde yacimiento naturales. Estas empresas presentan las ventajas de que cuentan con experiencia, infraestructura y capacidad instalada. Sin embargo, este proyecto presenta la ventaja competitiva de que la materia prima proviene de relaves, implicando un menor impacto ambiental y también puede disminuir los costos operativos.

En el contexto actual, la rivalidad entre competidores es baja, ya que el origen de las materias primas es distinto, lo que brinda una oportunidad estratégica para que este proyecto se posiciones con una ventaja competitiva clara, aprovechando la tendencia hacia procesos de menor impacto ambiental.

3.2.2 Amenaza de entrada de nuevos competidores

- **Barrera tecnológica:** dado el atractivo potencial económico, es posible que surjan nuevos participantes interesados en ingresar al mercado. No obstante, estos enfrentan barreras significativas, en especial las tecnológicas, ya que la producción de tierras raras requiere procesos complejos, y aún más cuando se trata de reprocesar relaves para su obtención. Esta barrera tecnológica dificulta la entrada de nuevos competidores.
- **Legislación Chilena:** en Chile la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente también impone barreras regulatorias, ya que obliga a las empresas mineras a someter sus proyectos a un proceso de evaluación ambiental.

En general la amenaza es moderada a alta. La barrera tecnológica representa una amenaza moderada, ya que depende de la accesibilidad a las tecnologías y la capacidad de inversión de los

nuevos competidores. Además, al asumir que la ley cada vez será más estricta, la amenaza se hace alta.

3.2.3 Poder de negociación de los proveedores

- **Proveedor de relaves:** en caso de que el relave se encuentre en estado de abandono, de acuerdo con el artículo 6 del código de minería, podrá constituirse concesión sobre las sustancias minerales concesibles, si y solo si se encuentre en terrenos abiertos y francos. En el caso de ser relave en estado inactivo, las negociaciones serán particulares y dependerán del dueño del depósito, lo que puede limitar el poder de negociación de los proveedores. Aumentando la fuerza.
- **Proveedores de equipos y tecnología:** En cuanto al procesamiento de relaves para la obtención de tierras raras, muchos de los equipos que se utilizan ,también se utilizan para procesar otros elementos como el cobre. Por lo tanto, hay múltiples proveedores, reduciendo el poder de negociación.
- **Proveedores de reactivos químicos:** el procesamiento para la obtención de tierras raras requiere de reactivos químicos comunes y especializados. Para el caso de los reactivos comunes, el poder de negociación es bajo, mientras que para los reactivos más especializados el poder de negociación aumenta.

3.2.4 Poder de negociación de los compradores

- En el modelo maquila, los compradores corresponden a las mismos dueños de las minas. Por lo tanto, el poder de negociación es alto, ya que pueden o no contratar el servicio.

3.2.5 Amenaza de productos o servicios sustitos

La amenaza se centra en que los dueños de las minas decidan procesar sus relaves internamente o contratar a otra empresa. Por lo tanto, es una fuerza alta.

3.3 Propuesta de estrategia

Con base en el análisis FODA y las cinco fuerzas de Porter, se propone la siguiente estrategia:

- i. Posicionamiento en el mercado:
 - Enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia: Posicionar el servicio de procesamiento de tierras raras a partir de relaves como una alternativa competitiva y sostenible, destacando el uso de pasivos ambientales, y además incluir una gestión hídrica optimizada.
 - Diversificación de la oferta de servicios: No limitarse solo a la extracción de tierras raras, sino también productos secundarios como el concentrado de cobre.
- ii. Minimización de riesgos externos:
 - Desarrollo de Relación a Largo Plazo con Clientes Clave: Iniciar con contratos a largo plazo para asegurar la fidelidad de los clientes.
- iii. Fortalecimiento de la propuesta frente a la competencia internacional:
 - Capacitación y formación continua del equipo: Para contrarrestar la falta de experiencia en el procesamiento de tierras raras, invertir en la capacitación y actualización continua del

equipo técnico, mediante alianzas con centros de investigación y participación en conferencias internacionales de tierras raras y minería.

- iv. Superación de debilidades
 - Invertir en investigación y desarrollo (I+D): para crear procesos más eficientes, lo que puede reducir los costos operativos a largo plazo.

4 Metodología

Para el desarrollo de esta memoria se seguirán la siguiente metodología:

- i. Realizar un estudio de mercado de las tierras raras para conocer los actores principales en la cadena de suministro de las tierras raras, poder identificar un mercado objetivo y el precio de venta del mercado de carbonato mixto de tierras raras.
- ii. Búsqueda bibliográfica de técnicas de procesamiento para la extracción de material de relave, concentración física y técnicas hidrometalúrgicas específicas de las tierras raras.
- iii. Análisis de materias primas, utilizando la base de datos del Sernageomin, con el fin de determinar un depósito de relave a procesar. Para ello se debe:
 - a. Establecer criterios para seleccionar un depósito de relaves y obtener una matriz con cinco depósitos.
 - b. Analizar acceso de agua, espacio para la disposición de residuos y aspectos sociales de cada depósito obtenido en el inciso anterior y determinar el depósito
- iv. Diseño del proceso adaptado a las condiciones físico-químicas del relave seleccionado.
 - a. Descripción del proceso bajo supuestos de tipo de mineral.
 - b. Diagrama de proceso
 - c. Balances de masa
 - d. Dimensionamiento equipos principales
- v. Estimación de costos de inversión considerando los costos de los equipos principales. De esta forma calcular la inversión total como la inversión total de capital.
- vi. Estimación de costos de operación, subdividido en costos fijos y variables.
- vii. Determinar los aspectos legal ambiental del servicio de procesamiento de relaves.
- viii. Análisis económico de la rentabilidad del servicio de procesamiento de relaves. Se analizarán cinco casos, el caso 1 o caso base que corresponde al servicio de procesamiento solo con la recuperación de cobre, caso 2: determinar una tarifa de carbonato mixto de tierras raras para un VAN igual a cero, caso 3: determinar una tarifa de carbonato mixto de tierras raras que permita tener un retorno de la inversión en el tercer año, caso 4: considerar que el cliente procesa sus relaves y caso 5: determinar una tarifa de carbonato mixto de tierras raras y evaluar la rentabilidad del servicio.
- ix. Análisis de sensibilidad de las variables de inversión, ley de cobre, eficiencia de extracción de cobre y tierras raras y servicios en el VAN para recomendar medidas de mitigación.

5 Estudio de mercado

5.1 Bases del estudio de mercado

El estudio de mercado tiene como objetivo analizar el mercado de las tierras raras, identificando la necesidad que cubren estos elementos, definiendo el producto, y evaluando la demanda, que está determinada por las tendencias en el tamaño del mercado, así como los segmentos potenciales de clientes. Además, se busca recopilar antecedentes sobre la producción de tierras raras y sus principales actores. Por último, se determinará la proyección del precio de mercado del carbonato mixto de tierras raras, en función de su precio actual y de los metales de tierras raras, ya que la información sobre el carbonato es limitada.

5.2 Necesidad del mercado

En la industria moderna, existe la necesidad de sostenibilidad y economía circular. Esto requiere del desarrollo de dispositivos más eficientes y compactos, especialmente en sectores como la energía renovable, los vehículos eléctricos y la electrónica avanzada. Sin embargo, estos avances se ven limitados porque requieren grandes cantidades de material para alcanzar un rendimiento adecuado, lo que incrementa los costos y dificulta la optimización de los dispositivos.

Las tierras raras surgen como una solución a este desafío, debido a sus propiedades magnéticas por unidad de masa, que superan ampliamente a las de los materiales tradicionales. Estas características las posicionan como esenciales para impulsar la eficiencia energética, reducir el consumo de recursos y acelerar la transición hacia un futuro más sostenible.

5.3 Producto

En este proyecto, se producirá carbonato mixto de tierras raras (*MREC: Mixed Rare Earth Carbonate*) con fórmula $RE_2(CO_3)_3$ como contribución a la cadena de producción de estos metales. El MREC es un producto intermedio en la industria de las tierras raras y se utiliza como materia prima para la producción óxidos de tierras raras (REO: Rare Earth Oxide, con fórmula general RE_2O_3) para luego refinarlos y producir metales individuales de tierras raras.

Su composición específica puede variar y se acuerda entre el proveedor y el comprador. No obstante, la especificación técnica pública establece que el contenido de tierras raras debe ser igual o superior al 45%.

5.4 Propuesta de valor

La propuesta de valor para los clientes es ofrecer un suministro de carbonato mixto de tierras raras con un contenido mínimo de 45% en peso, producido a partir de residuos mineros, lo que otorga valor a las empresas y contribuye a la sostenibilidad y economía circular.

5.5 Segmento donde existe la necesidad

El segmento donde existe la necesidad son empresas que se especializan en la separación y refinación de estos elementos de tierras raras. Estas empresas transforman el carbonato mixto en óxidos y/o metales de tierras raras de alta pureza, que luego son comercializados y utilizados en

diversas aplicaciones tecnológicas. Algunas empresas que adquieren carbonato mixto de tierras raras como materia prima son:

i. Lynas Rare Earths

Lynas Rare Earths es el mayor proveedor de compuestos de tierras raras fuera de China. Opera la mina Mount Weld en Australia y cuenta con instalaciones de procesamiento en Australia y Malasia. Está construyendo una planta de procesamiento de tierras raras pesadas en Texas con un financiamiento de \$288 millones proporcionado por el Departamento de Defensa de los EE. UU., la cual estará operativa para el año fiscal 2026. Esta planta tendrá capacidad para procesar materiales de terceros (Mining.com, 2024).

ii. Solvay

La empresa química Belga Solvay está ampliando sus operaciones en La Rochelle, Francia, con el objetivo de comenzar a separar y producir óxidos de tierras raras necesarios para imanes permanentes en 2025 (Mining.com, 2024).

Solvay y Hastings han firmado un acuerdo preliminar con la intención de suministro de Carbonato Mixto de Tierras Raras (MREC) (Solvay, 2022).

iii. REEtec

REEtec en Noruega, respaldada por el minero sueco LKAB, está construyendo una planta comercial de separación de tierras raras que entrará en producción en 2025. Se está discutiendo con las empresas para proporcionar concentrado para la planta (Mining.com, 2024).

iv. Iluka

Iluka Resources está construyendo su refinería de tierras raras Eneabba en el noroeste del país que procesará tierras raras pesadas de sus propias minas y de terceros como Northern Minerals (Mining.com, 2024).

v. Neo Performance Materials

Neo Performance Materials, que cotiza en Toronto, produce óxidos de tierras raras, polvos magnéticos e imanes permanentes. Tiene instalaciones en todo el mundo, incluyendo China, Estados Unidos, Alemania, Canadá, Tailandia y el Reino Unido (Mining.com, 2024).

vi. Ucore Rare Metals

Ucore Rare Metals de Canadá está construyendo una instalación de separación de tierras raras pesadas y ligeras en Luisiana que estará en funcionamiento a finales de 2025.

vii. Rainbow Rare Earths

Rainbow Rare Earths ha iniciado un proceso de separación de óxidos de tierras raras en una instalación de K-Technologies en Florida, EE. UU. Este proceso utiliza como materia prima un carbonato de tierras raras que planean producir a partir de su proyecto Phalaborwa, ubicado en Sudáfrica (Rainbow, 2024).

viii. Energy Fuels

Energy Fuels, un productor estadounidense de uranio y elementos de tierras raras, ha comenzado a producir cantidades comerciales de tierras raras separadas en sus operaciones de Utah, donde espera producir hasta 1.000 toneladas de neodimio-praseodimio al año (Rainbow, 2024).

5.6 Demanda

Para el segmento objetivo, debido a la limitada información disponible sobre el producto en cuestión, su demanda se estimará en base al mercado de los metales de tierras raras, el cual cuenta con una historial y proyección de demanda disponibles.

El tamaño del mercado de metales de tierras raras se estima en 175,03 kt en 2024 a nivel mundial y se espera que alcance 214,89 kt en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual (CAGR) del 4,19% durante el período previsto (2024-2029) (Mordor Intelligence, 2024). Y se prevé que el valor del mercado se expanda a una tasa CAGR del 10,2 % entre 2024 y 2031, aumentando de 5.800 millones de dólares en 2024 a 11.500 millones de dólares a finales de 2031. (Persistence Market Research, 2024).

Ahora, para determinar la demanda de carbonato de tierras raras se trabaja bajo los siguientes supuestos:

- i. Se utiliza como base de cálculo la demanda de los metales de tierras raras del año 2024.
- ii. Dado que las tierras raras con mayor demanda son las magnéticas (neodimio, samario, disprosio y praseodimio), es que se va a utilizar al neodimio para representar las tierras raras en este cálculo.

Entonces, los pasos para producir una 1 tonelada de metal de neodimio 99,99% son los siguientes:

- i. En 1 tonelada de metal de neodimio, la ley es del 99,99%, entonces en 1 tonelada hay 0,9999 toneladas de neodimio.
- ii. Ahora, se desea obtener la misma cantidad de toneladas de neodimio en su forma carbonatada ($Nd_2(CO_3)_3$), entonces si la ley del neodimio en el carbonato es del 62% y este porcentaje representa las 0,9999 toneladas de neodimio, entonces, la masa de carbonato es de 1,6 toneladas.
- iii. Establecida esta relación de 1,6, es que se puede extrapolar el cálculo de la demanda total de carbonatos de tierras raras. Entonces, si la demanda del año 2024 fue de 175,03 kt, la demanda de carbonatos de tierras raras fue de 280,048 kt.

Con esta relación y los datos sobre la proyección de la demanda de metales se puede determinar la proyección de la demanda de carbonatos, Figura 6, alcanzando 344 kilotoneladas para el año 2029.

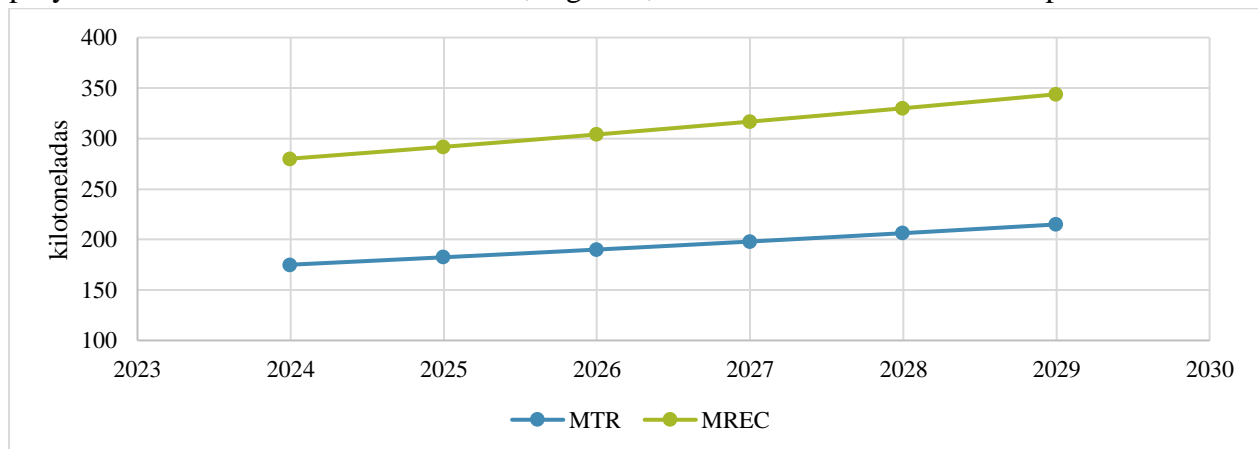


Figura 6: Proyección de la demanda de metales de tierras raras y MREC.

5.7 Oferta de tierras raras

La cadena de suministro de tierras raras incluye distintas etapas presentadas en la Figura 7.

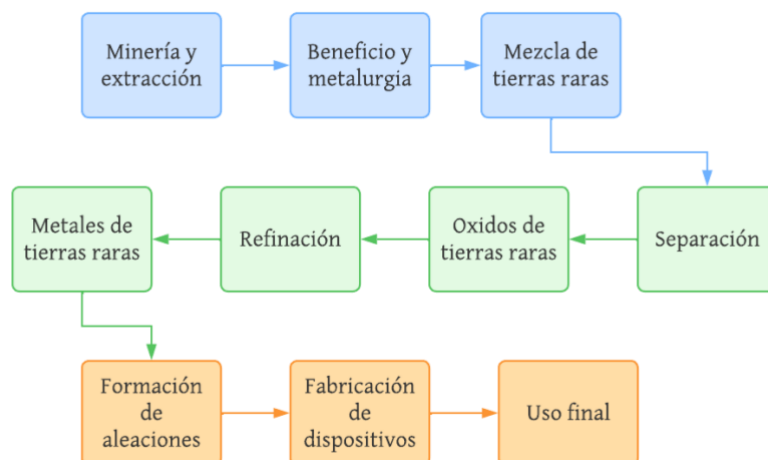


Figura 7: Cadena de suministro de tierras raras.

Actualmente, China lidera las etapas de minería hasta refinación. En 2023, representó el 68,57% de la minería (USGS, 2024) y en el año 2022 alrededor del 90% de la capacidad global de separación (incluye beneficio y metalurgia) y refinación, mientras que Malasia y otros países compartieron el resto (Tierras Raras, 2024).

MP Materials ha ampliado rápidamente la producción en los EE. UU., desde que reabrió la mina Mountain Pass en California en 2018, y en 2023 EE. UU. representa aproximadamente el 12,3% de la producción mundial de óxidos de tierras raras. Situándose como el segundo productor mundial después de China.

Australia es otro productor importante de tierras raras a través de Lynas Resources en Mt Weld (con separación de tierras raras que se lleva a cabo en Malasia) e Iluka Resources a través de sus operaciones de arenas minerales en Eneabba. Ambas operaciones están ubicadas en Australia Occidental (Tierras Raras, 2024).

Myanmar se ha convertido en un proveedor clave de concentrados de adsorción de iones de HREE para las instalaciones de separación en China. Estos provienen principalmente de operaciones de tipo artesanal (Tierras Raras, 2024).

Los datos más recientes sobre la producción de tierras raras, específicamente en el ámbito de la minería corresponden al año 2023, ver Tabla 9.

Tabla 9: Producción mundial de REO's 2023 en kt.

Fuente: (USGS, 2024)

País	Producción 2023, toneladas	%
Estados Unidos	43.000	12,29%
Australia	18.000	5,14%
Brasil	80	0,02%
Myanmar	38.000	10,86%
China	240.000	68,57%
India	2.900	0,83%
Madagascar	960	0,27%
Malasia	80	0,02%
Rusia	2600	0,74%
Tailandia	7.100	2,03%
Vietnam	600	0,17%
Total (redondeado)	350.000	100,00%

Históricamente la producción de tierras raras ha estado marcada por el dominio de China. Como se observa en la Figura 8, la producción de estos elementos data de la década de 1960, cuando Estados Unidos, con el yacimiento de Mountain Pass, era el principal productor (COCHILCO, 2016). La producción aumentó rápidamente, y Estados Unidos mantuvo una alta participación hasta la década de 1980, cuando China comenzó a incrementar su producción. Desde finales de la década de 1990 hasta la década de 2010, China llegó a representar más del 90% de la producción mundial (USGS, 2023).

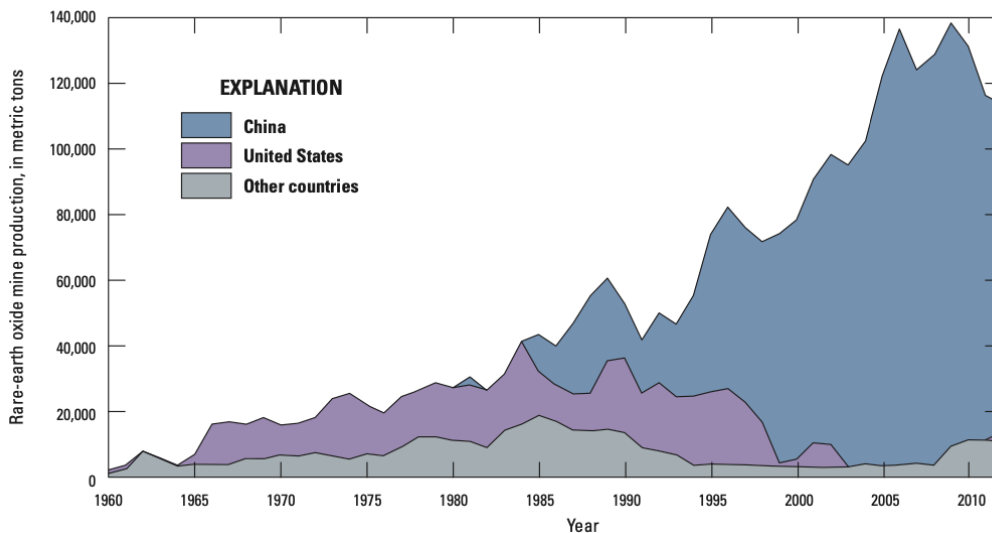


Figura 8: Producción minera mundial de REO's, de 1960 a 2012.

Fuente: (USGS, 2023)

En el segundo semestre del año 2010, el Ministerio de Comercio (MOFCOM) y el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información de China redujeron las cuotas de exportación de tierras raras, en un 64% respecto al primer semestre, lo que provocó un aumento en los precios de estos elementos, alcanzando su máximo en 2011. Además, se generó una preocupación internacional de riesgo de suministro por parte de Japón, Estados Unidos y Francia, principales mercados de exportación de REE de China. Esta situación culminó en 2014 cuando, tras un fallo de la Organización Mundial del Comercio en 2013, China anunció el fin de las restricciones a la exportación de tierras raras (USGS, 2023).

Este escenario impulsó a otros países a tomar medidas para explorar y producir tierras raras. Como consecuencia Australia y Estados Unidos inician sus operaciones mineras en 2011 y 2012, respectivamente (USGS, 2023).

5.8 Precio de mercado de Carbonatos de Tierras Raras

El precio del MREC varía en función de su pureza y la distribución de las tierras raras, siendo las tierras raras magnéticas las mejor valoradas. Al 05 de noviembre de 2024, el precio del MREC es de 34.350 CNY/t, equivalente a 4.821 USD/t, calculado en función del tipo de cambio actual (SMM, 2024).

Dado que no se dispone de información sobre las tendencias del precio del MREC y dado que este es utilizado como materia prima para la producción de metales, es que se estimará su precio en función de los metales.

Según un informe de Adamas Intelligence, existe una advertencia sobre la escasez de óxidos de tierras raras debido a la falta de nuevas fuentes de suministro, tanto primarias como secundarias, contribuirá a una escasez global de óxidos principalmente magnéticos, con un desabastecimiento de 16.000 toneladas para 2030 (Mining, 2021). Por ende, también habrá una escasez de MREC.

De acuerdo a lo indicado en la sección 5.6, para estimar el precio de los carbonatos se siguen los siguientes pasos con supuestos:

- i. La cadena de valor de los metales en comparación con los carbonatos, es que los primeros se les agrega valor en las etapas de separación y refinación. Operaciones de alto costo, ya que es necesaria una infraestructura compleja. Al comparar directamente el precio actual del carbonato con el promedio de los metales, el carbonato representa solo el 14,5% del precio de estos.
- ii. Se va a suponer que en la proyección de los precios está incluido el supuesto de escasez de fuentes de suministro.
- iii. Entonces, con los dos supuestos mencionados en i y ii se calcula el precio de los metales en el periodo 2025-209 con dos tasas (CAGR) de crecimiento, una optimista del 10,2% mencionada anteriormente y otra conservadora del 8,5% que ha sido la tasa histórica de crecimiento del periodo 2018-2023 (Persistence Market Research, 2024) presentados en la Tabla 10.

Luego, a partir de esos precios se calcula el precio de los MREC con ambas tasas, multiplicando cada precio USD/ton por el factor de 14,5%, presentados en la

- iv. Tabla 11. Se proyecta que para el 2029 la tonelada de MREC sea de 6.381 USD en el supuesto optimista y 5.904 USD en el escenario conservador.

Tabla 10: Proyección de precios para metales de tierras raras.

	USD/t CAGR: 10,2%	USD/t CAGR: 8,5%
2024	33.137	33.137
2025	35.049	34.508
2026	37.070	35.935
2027	39.209	37.422
2028	41.470	38.970
2029	43.862	40.582

Tabla 11: Proyección de precios para MREC.

	USD/t CAGR: 10,2%	USD/t CAGR: 8,5%
2024	4.821	4.821
2025	5.099	5.020
2026	5.393	5.228
2027	5.704	5.444
2028	6.033	5.670
2029	6.381	5.904

5.9 Tendencias del mercado de tierras raras

5.9.1 Creciente demanda de imanes

Los imanes representan una de las aplicaciones más importantes de los elementos de tierras raras. Se utilizan diversas industrias, como la electrónica, automovilística, generación de energía y la medicina.

De acuerdo con el Escenario de compromisos anunciados del estudio realizado por IEA, la demanda total de tierras raras magnéticas alcanzará las 131 kt en 2030 y las 181 kt en 2050 (IEA, 2024).

5.9.2 Tendencias regionales de la minería

En el período hasta 2030, China sigue siendo el principal país minero en cuanto a suministro de tierras raras magnéticas, pero Australia aumenta su participación en el total mundial al 18% y los Estados Unidos mantienen su participación similar a los niveles actuales en el 7% (IEA, 2024).

5.9.3 Tendencias regionales de refinación

En materia de refinación, el dominio chino en 2023 no tuvo rivales. En el resto del mundo, las refinerías propiedad de Lynas en Malasia, Vietnam Rare Earth JSC (VTRE) en Vietnam y Neo Performance Materials en Estonia (Silmet) son los pocos productores a escala industrial destacados. La región de más rápido crecimiento en términos de producción refinada de tierras

raras magnéticas entre hoy y 2030 es Malasia, que aumenta su participación en la producción refinada mundial del 5 % al 12 % (IEA, 2024).

6 Estudio Técnico

6.1 Bases del Estudio Técnico

El estudio técnico tiene por objetivo diseñar un proceso adecuado para ofrecer el servicio de procesamiento de relaves y producir carbonato mixto de tierras raras con una pureza del 45% en peso y concentrado de cobre con una pureza del 20% en peso y estimar los costos de inversión y operación.

Este estudio evalúa diversas tecnologías disponibles, ya que no existe un proceso estándar para la extracción de tierras raras y tampoco un proceso para la remoción desde relaves. Por lo tanto, se estudian técnicas para la remoción de relaves, molienda de rocas, para la etapa de beneficios operaciones unitarias, como la separación gravimétrica, magnética, y flotación y luego se estudian todas las tecnologías disponibles para la extracción de tierras raras. Luego, se analizan las materias primas, y se selecciona aquella que mejor se ajuste de acuerdo con criterios establecidos, a los cuales se le asignan valores para seleccionar el con mayor puntaje. Se realizarán los balances de materia, definición y dimensionamientos de los equipos necesarios y su costo para estimar la inversión y costos de operación.

6.2 Proceso general

A diferencia de la minería tradicional, el procesamiento de relaves no requiere una etapa de chancado. Sin embargo, sí es necesaria la molienda, ya que un tamaño de partícula adecuado es crucial para liberar los minerales de interés. Este tipo de molienda difiere de la realizada en rocas, ya que el relave tiene una dureza considerablemente menor. Omitir los procesos de chancado y molienda, de roca dura, conlleva beneficios económicos, ya que representa el 43% aproximadamente de los costos de operación en una mina (Araya & et al, 2019).

En consecuencia, el proceso para la obtención de tierras raras desde fuentes secundarias se puede representar en cuatro etapas generales: remoción del material, molienda, beneficio e hidrometalurgia, mostrado en la Figura 3: Alcance del estudio.

6.3 Remoción

La remoción corresponde a la extracción física del relave, utilizando equipos especializados que dependen de la humedad del relave, para su transporte a la planta de procesamiento.

La clasificación por humedad de los relaves se presenta en la Figura 9.

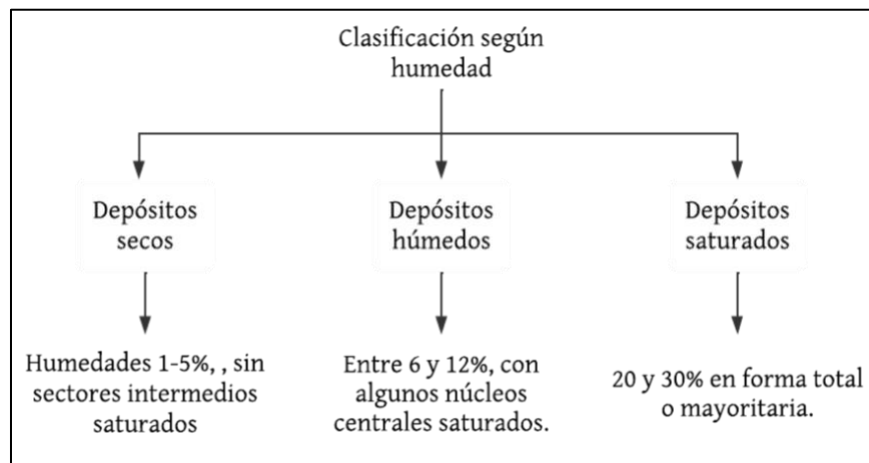


Figura 9: Clasificación depósitos de relaves según humedad.

- En el caso de depósitos secos, se privilegia el uso de cargadores y camiones debido a la estabilidad del depósito. Sin embargo, es necesario controlar la generación de polvo, lo cual se puede lograr mediante riego frecuente (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020).
- Para los relaves húmedos, se recomienda la remoción por pitoneo hidráulico, un sistema que utiliza chorros de agua a alta presión. Los valores típicos de presión de agua en este método varían entre 200 y 350 psi, con caudales del orden de 20 l/s a 50 l/s por pitón (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020).
- Finalmente, para los relaves saturados, considerando la alta sismicidad de Chile, se sugiere la remoción por dragado (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020). Este método se define como la extracción de materiales cubiertos por una capa de agua (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010) y se lleva a cabo utilizando dragas, que son equipos especializados en la succión de material bajo el agua.

6.4 Molienda

Como se mencionó anteriormente, los relaves provienen de proceso de conminución, sin embargo tanto para aquellos que ya están depositados hace años como los relaves frescos requieren de una molienda para asegurar la liberación de los minerales.

Este proceso se lleva a cabo con molinos de bola en conjunto con un hidrociclón, el cual permite que las partículas que cumplen con el diámetro requerido continúan con el proceso, mientras que las de mayor tamaño son recirculadas al molino hasta que cumplan con el tamaño.

6.5 Beneficio

La etapa de beneficio comprende operaciones unitarias de concentración física. Los procesos de concentración física tienen como objetivo eliminar impurezas para aumentar la ley de los elementos de interés. En la minería de tierras raras, es crucial concentrar físicamente los minerales debido a las bajas leyes de estos elementos.

Los métodos más utilizados en la concentración física incluyen una combinación de las siguientes técnicas: separación por gravedad, separación magnética, separación electrostática y flotación.

La separación electrostática requiere que el concentrado esté seco, por lo que para aplicar esta operación es necesario secar el concentrado, lo cual consume una cantidad considerable de energía haciendo que esta técnica no sea muy utilizada (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024). Por lo tanto, no se va a profundizar sobre esta técnica.

6.5.1 Separación gravimétrica

La separación gravimétrica consiste en separar minerales aprovechando el efecto de la gravedad sobre el movimiento de las partículas. En esta técnica, el tamaño de las partículas es un factor crucial, ya que a medida que disminuye, las fuerzas de viscosidad y fluidez se vuelven más predominantes en comparación con la densidad, lo que reduce la eficiencia del proceso (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020).

Esta técnica es ampliamente utilizada en las plantas de tierras raras Chinas, incluyendo el yacimiento Bayan Obo (Jordens, y otros, 2016).

La gravedades específicas de los minerales de tierras raras son relativamente altas, toma valores desde 2,9 hasta 7,2 (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024) comparado con los minerales de ganga que tienen valores cercanos a ~2,5 (Jordens, y otros, 2016), ver Tabla 12.

Existen distintos métodos de separación:

- **Separación por corrientes:** Utiliza la diferencia en sedimentación de partículas a través de corrientes verticales, longitudinales, oscilatorias y centrífugas. En este contexto, el JIG es un equipo clave, donde las partículas se separan por pulsaciones en un flujo de agua de acuerdo a densidad y tamaño, aprovechando la sedimentación libre y obstaculizada (Castro Bravo, 2022).
- **Separación mediante corrientes superficiales de agua:** se aprovecha la diferencia de pesos entre las partículas que conforman la mena, siendo los equipos más utilizados la mesa vibratoria y la espiral (Castro Bravo, 2022).

6.5.2 Separación magnética

Consiste en separar minerales de acuerdo con las diferencias en el coeficiente de magnetización específico entre las tierras raras y otros minerales (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024), ver Tabla 12. Esta técnica se aplica para eliminar minerales altamente magnéticos, como la magnetita y hematita (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

Las tierras raras son de carácter paramagnético por lo que si no están asociadas a elementos ferromagnéticos pueden ser separadas mediante la aplicación de un campo magnético de baja intensidad (*LIMS: Low Intensity Magnetic Separators*), con valores de campos menores a 0,6 Tesla (Abaka-Wood, Addai-Mensah, & Skinner, 2021). Por el contrario si se aplica una separación magnética de alta intensidad (*HIMS: High Intensity Magnetic Separation*), podría removerlos y perderlos en la fracción magnética. (Jordens, Rawson, Sheridan, & Waters, 2014)

Para llevar a cabo esta separación los equipos disponibles y están clasificados como separadores magnéticos de baja y alta intensidad, LIMS y HIMS. (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020)

Es importante evaluar esta operación antes o después del proceso de flotación, ya que, la presencia de minerales ferrosos afecta de forma negativa el proceso de flotación, aumentando el uso de reactivos.

Tabla 12: Gravedad específica y propiedades magnética de algunos minerales en relaves.

Fuente: (Jordens, Rawson, Sheridan, & Waters, 2014)

Míneral	Gravedad específica	Propiedad magnética
Cuarzo	2,63	Diamagnético
Óxidos de Fe	5,30	Ferromagnético
Calcita	2,71	Diamagnético
Bastnasita	4,98	Paramagnético
Monacita	5,15	Paramagnético
Apatita	3,18	Diamagnético
Calcita	2,71	Diamagnético
Fluorita	3,18	Diamagnético

6.5.3 Flotación

La flotación es una técnica de separación físico química ampliamente utilizada en la industria de las tierras raras y se emplea en plantas como Bayan Obo, Mountain Pass y Weishan Lake. En Bayan Obo, la alimentación del proceso de flotación proviene de los relaves generados durante el procesamiento de mineral de hierro, mientras que en las otras plantas se trata de mineral bruto (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

Si bien son muchos los factores que afectan el proceso de flotación, la presencia de ultrafinos afecta de forma negativa el proceso, promoviendo la recuperación tanto de óxidos de hierro como minerales de silicatos. Por lo que, en el caso de que las tierras raras se encuentran en la fracción de partículas finas y ultrafinas se recomienda revisar la flotación de ultrafinos (Abaka-Wood, Addai-Mensah, & Skinner, 2021).

Para llevar a cabo este proceso es necesario el uso de reactivos químicos que modifiquen la superficie de los minerales de interés, transformándola en hidrófoba para que floten y puedan ser recuperados. Los reactivos incluyen colectores, que permiten que las partículas se vuelvan hidrofóbicas; espumantes, que estabilizan la espuma en la superficie; y modificadores, que ajustan el pH y otras condiciones del proceso.

6.5.3.1 Colectores

En la flotación de tierras raras se utilizan colectores de oxhidrilo, estos son: ácidos hidroxámicos, carboxilatos y ácidos fosfóricos. Estos colectores se caracterizan por sus grupos funcionales que consisten en un anión de oxígeno y un oxígeno de doble enlace, al que se unirá un catión metálico. Se diferencian según el átomo al que está unido el oxígeno: en los hidroxamatos, el oxígeno está unido al nitrógeno; en los carboxilatos, al carbono; y en los ácidos fosfóricos, al fósforo. Por lo tanto, en los hidroxamatos, el oxígeno con un solo enlace presente en los hidroxamatos será el donador de electrones más débil y estará menos disponible para interactuar con cationes metálicos.

Siendo así los hidroxamatos los colectores más selectivos y eficientes del grupo y actualmente los más usados para la flotación de bastnasita y monacita (Marion, Li, & Waters, 2020).

6.5.3.1.1 Ácidos Hidroxámicos

Los ácidos hidroxámicos son un grupo de colectores aniónicos que forman complejos con cationes metálicos presentes en la superficie de los minerales. Forman complejos estables con Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} y Pb^{2+} , seguidos por los cationes de tierras raras (RE^{3+}), y complejos más débiles con cationes de metales alcalinotérreos (grupo IIA de la tabla periódica). La presencia de altas concentraciones de iones indeseados consume al colector, afectando negativamente la respuesta de flotación (Marion, Li, & Waters, 2020).

Por último, el pH óptimo para la flotación se produce alrededor de pH 9. Este es aproximadamente el pKa (constante de disociación ácida) de los recolectores de ácido hidroxámico (Pradip & Fuerstenau, 1985).

6.5.3.2 Espumantes

Los espumantes se utilizan para asegurar la formación y estabilidad de las burbujas, evitando su coalescencia espontánea, de modo que el mineral adherido pueda ascender a la superficie de la celda y ser recuperado (Yianatos, 2015).

Los espumantes más utilizados a escala industrial son F159, EM-312 y Aerofroth-88 mientras que en estudios de flotación de tierras raras se utiliza metil isobutil carbinol (MIBC) (Julapong, y otros, 2023).

6.5.3.3 Modificadores

Estos reactivos son del tipo modificadores de superficie actuando como depresantes o activadores o reguladores de pH.

- Ácido cítrico y Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)

Son modificadores de superficie que se utilizan para limpiar los iones de calcio de la superficie de la monacita, aumentando la recuperación (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024). El EDTA muestra una mayor eficacia en la recuperación de monacita en comparación con el ácido cítrico en dosis óptimas, y tiene un menor efecto depresor sobre la monacita cuando se utiliza en dosis elevadas (Marion, Li, & Waters, 2020).

- Carbonato de Sodio

El carbonato de sodio se utiliza como un modificador de pH y es ampliamente usado en la flotación de bastnasita para regular la concentración de iones carbonato en la solución. Los iones de carbonato, además, afectan las propiedades superficiales de otros minerales como la bastnasita y minerales de ganga como la calcita y barita (Marion, Li, & Waters, 2020) afectando el potencial zeta de los minerales (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

- Silicato de sodio

Es un depresante utilizado para deprimir ganga de silicato, minerales de sal, tales como: fluorita, barita ($BaSO_4$), calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), minerales de hierro y minerales asociados con monacita y xenomita en depósitos de placer (Marion, Li, & Waters, 2020). En Bayan

Obo es un reactivo importante, ya que se utiliza junto con un colector de hidroxamato para separar los minerales de tierras raras de la ganga (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

- Sulfonato de lignina

Se utiliza como depresor selectivo de la barita (BaSO_4) (Marion, Li, & Waters, 2020). En Mountain Pass es utilizado para deprimir minerales de calcita, barita y otros minerales de ganga (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024). No obstante, tiene una mayor afinidad por la barita. (Marion, Li, & Waters, 2020). Es importante considerar que una dosis excesiva de este depresor es perjudicial para la flotación de la bastnasita, ya que afecta negativamente al colector (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

- Sulfuro de Sodio

Es un activador de la monacita y un depresor del circón cuando se utiliza un colector de ácidos grasos, dependiendo de la dosis. En dosis altas, el pirocloro y el circón son deprimidos sin afectar a la monacita (Marion, Li, & Waters, 2020).

6.6 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia, o también puede ser llamada concentración química, permite separar los elementos de interés de la ganga mediante reacciones químicas, obteniendo una solución concentrada de los mismos.

En la industria de las tierras raras se emplea esta técnica debido a que generalmente se trabaja con minerales de baja ley y muchas impurezas. Las técnicas de pirometalurgia y biohidrometalurgia, se descartan en este contexto por el alto consumo energético que no se compensa con las bajas leyes, y a las complejas interacciones entre los minerales y los microorganismos, respectivamente. Además de las operaciones que puede incluir la hidrometalurgia, tales como, lixiviación, extracción por solventes e intercambio iónico, en el procesamiento de tierras raras, antes de la lixiviación se aplica una técnica de *cracking* o también llamado descomposición.

La descomposición es un pretratamiento que tiene por objetivo liberar las tierras raras de la matriz donde están contenidas y así facilitar el proceso de lixiviación. Este proceso se lleva a cabo utilizando reactivos ácidos o básicos o se puede someter el material a altas temperaturas, proceso llamado tostación oxidativa. La técnica a utilizar depende del tipo de mineral que se quiera recuperar (McNulty & et al., 2022).

Esta sección será tratada por mineral para una mejor comprensión, primero se verá el tratamiento para la bastnasita y luego para la monacita.

6.6.1 Bastnasita

La bastnasita es el principal mineral portador de tierras raras en el yacimiento de Bayan Obo, China. Debido a su relevancia y a los avanzados procesos aplicados en esta mina, se revisarán los métodos de procesamiento utilizados para la extracción de tierras raras. Además, este yacimiento se caracteriza por poseer, en menores concentraciones, monacita, por lo que se desarrollaron procesos para la obtención de tierras raras desde ambos minerales. Los métodos utilizados incluyen: descomposición ácida y descomposición alcalina.

6.6.1.1 Proceso de tostado con ácido sulfúrico

El concentrado mixto de bastnasita y monacita se tuesta con ácido sulfúrico en un horno rotatorio a temperaturas superiores a 300°C para llevar a cabo la descomposición. Durante este proceso, el fluorocarbonato de tierras raras se transforma en sulfato, acompañado de la formación de fluoruro de hidrógeno y dióxido de carbono, ecuación 1. De manera similar, la matriz de fosfato se transforma en sulfato, ecuación 2. Y ambos sulfatos se lixivian con agua.

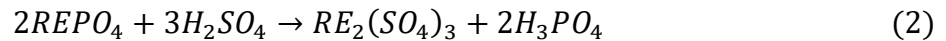
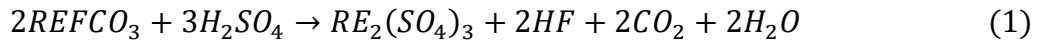
Sin embargo, los sulfatos de tierras raras no son altamente solubles en agua, por lo que generalmente se requiere una gran relación sólido-líquido de 1: (10-15).

Las impurezas como fósforo, hierro y torio se eliminan del PLS agregando cloruro férrico ($FeCl_3$) y seguido de óxido de magnesio (MgO) y las tierras raras se precipitan con bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3) (Cen, y otros, Extracción de tierras raras a partir de concentrados de bastnasita: una revisión crítica y una perspectiva de futuro, 2021).

Este proceso ha permitido posicionar a China como el principal proveedor de tierras raras en el mundo (Cen, y otros, Extracción de tierras raras a partir de concentrados de bastnasita: una revisión crítica y una perspectiva de futuro, 2021).

Otra opción es separar las tierras raras por grupos, por tierras raras pesadas y livianas, mediante procesos de extracción por solventes, utilizando HEHEHP (ácido fosfónico mono-2-etilhexil 2-etilhexil) y D2EHPA (ácido fosfórico di(2-etilhexil)), respectivamente, y extracción con HCl (Cen, y otros, Extracción de tierras raras a partir de concentrados de bastnasita: una revisión crítica y una perspectiva de futuro, 2021).

En la Figura 10 se observa el proceso de tostado con ácido sulfúrico.



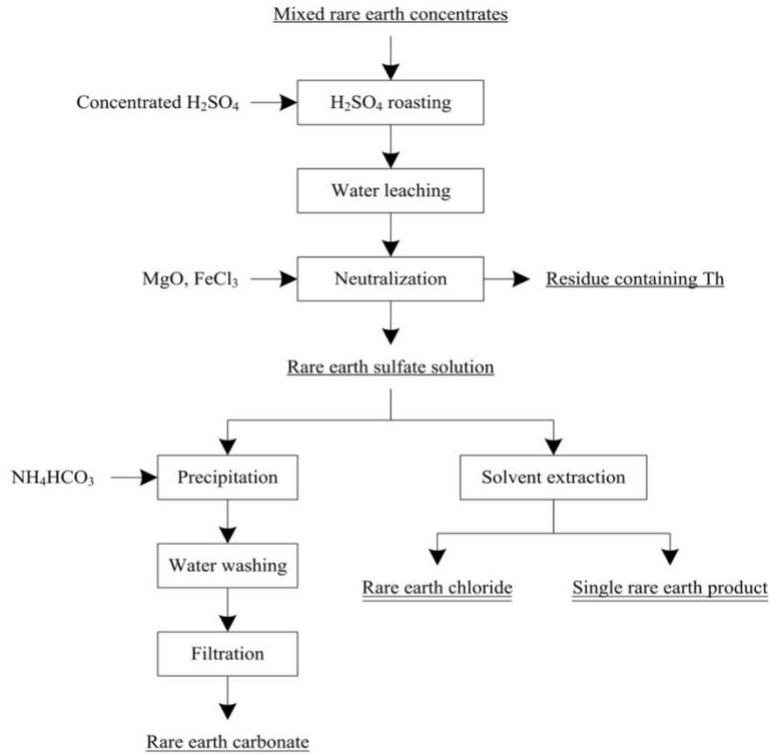


Figura 10: Diagrama de flujo de proceso de tostación con ácido sulfúrico.

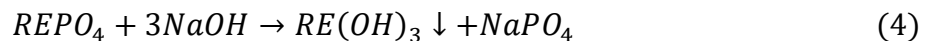
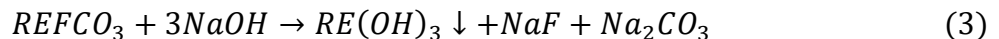
Fuente: (Cen, y otros, 2021)

En este proceso durante la tostación, si es llevado a cabo a temperaturas $>300^{\circ}\text{C}$ el torio presente en los concentrados se convierte en pirofosfato de torio insoluble, que es necesario sellar adecuadamente, mientras que si la temperatura de tostación es inferior a 300°C , se generará sulfato de torio soluble. En consecuencia, se lixiviaría junto con los elementos de tierras raras y se sometería a una separación adicional.

La principal técnica utilizada en la industria para separar el torio de las tierras raras es la extracción por solventes debido a su funcionamiento continuo y su alta eficiencia. Los extractantes más utilizados son: aminas primarias y Cyanex 92. Este último tiene una excelente capacidad de separación, pero su costo es mucho más alto que otros extractantes industriales como TBP y HEHEHP.

6.6.1.2 Descomposición con hidróxido de sodio

En esta vía de procesamiento, el hidróxido de sodio transforma tanto el mineral de bastnasita como la monacita en hidróxidos de tierras raras, de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4.



A diferencia del tratamiento ácido el proceso alcalino inicia con una limpieza ácida con ácido clorhídrico, llamada *Pickling*, ver Figura 11, que tiene por objetivo limpiar impurezas. El proceso continua con la descomposición a temperaturas entre $140\text{-}200^{\circ}\text{C}$, luego se eliminan las impurezas (fluoruro de sodio, fosfato de sodio y carbonato de sodio) y los hidróxidos se lixivian con ácido clorhídrico.

Aproximadamente el 10% del concentrado de Bayan Obo se procesa mediante este método. A diferencia del tostado con ácido sulfúrico, el proceso alcalino es relativamente más limpio; sin embargo, el costo del hidróxido de sodio incrementa los costos de producción.

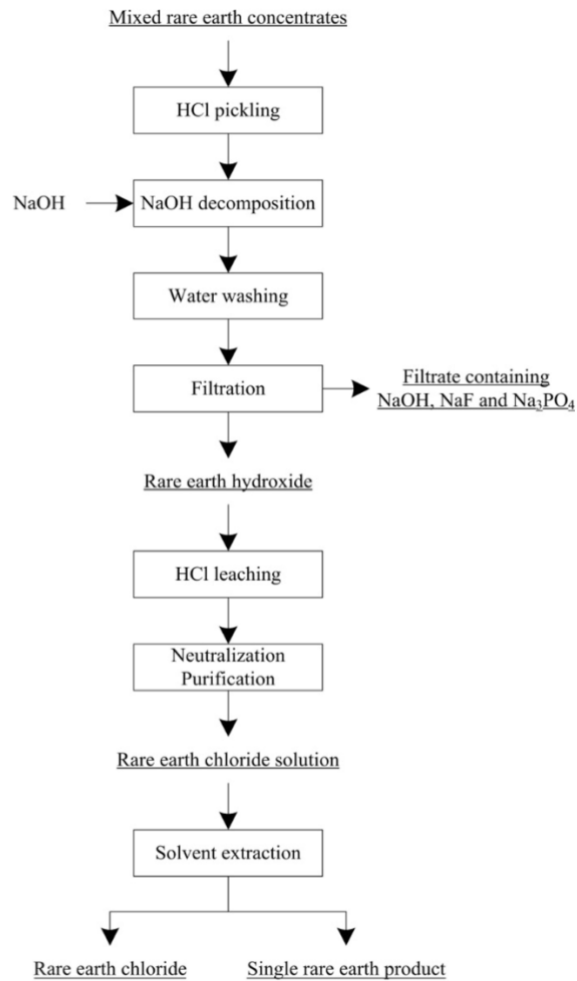


Figura 11: Diagrama de flujo proceso de descomposición con hidróxido de sodio.

Fuente: (Cen, y otros, 2021)

6.6.2 Monacita

Dentro de las técnicas de concentración química la descomposición alcalina es la técnica industrial preferida para el procesamiento de arenas de monacita de alto grado, mientras que el tratamiento ácido se utiliza normalmente para minerales/concentrados de menor grado (Kim & Osseo-Asare, 2012).

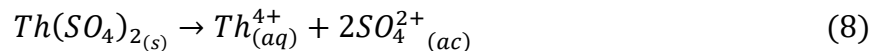
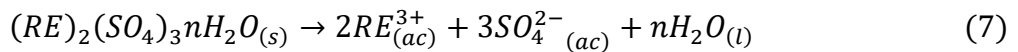
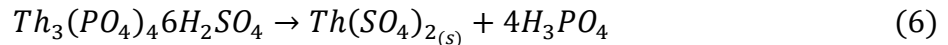
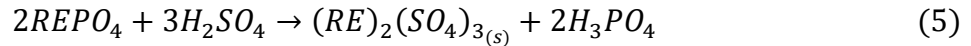
6.6.2.1 Descomposición ácida

El tratamiento con ácido es una técnica ampliamente utilizada para el procesamiento de monacita. Esta técnica se emplea tanto en Bayan Obo como en Lynas Corporation para procesar concentrado de monacita de Mount Weld (Demol, Ho, & Senanayake, 2018).

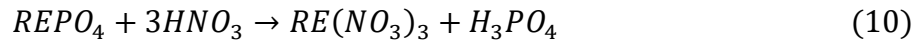
El proceso, que se observa en la Figura 12, consiste en poner en contacto el mineral con un ácido altamente concentrado. Por ejemplo, utilizar ácido sulfúrico al 93-98% en peso para destruir la

estructura de fosfato, ecuaciones 5 y 6, formando sulfatos de tierras raras $((RE)_2(SO_4)_3)$ y sulfato de torio $(Th(SO_4)_2)$ en estado sólido.

La digestión tiene que alcanzar temperaturas mínimas de 200°C hasta 250°C, para lograr la descomposición casi completa de la monacita. La relación ácido: concentrado es del rango 1:2,5 y el proceso puede completarse en un rango de 3-4 horas (Sadri, Nazari, & Ghahreman, 2017). Luego de la descomposición, sigue la lixiviación con agua fría, ecuaciones 7 y 8, con una relación sólido: líquido 1:7 (Kim & Osseo-Asare, 2012).



La digestión también puede ser llevada a cabo con ácido clorhídrico o nítrico. Las reacciones que ocurren se presentan a continuación:



El método de precipitación posterior generalmente se basa en reactivos como hidróxido de sodio, ácido oxálico, carbonato de sodio o amoníaco. Luego, en el proceso de separación, la última etapa, se puede utilizar la extracción por solvente y/o el intercambio iónico para separar las REE y el torio (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

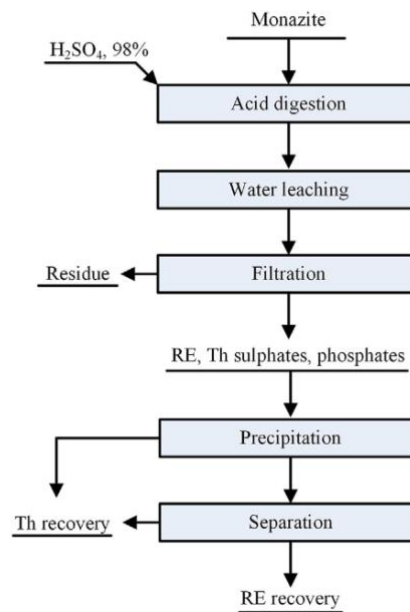


Figura 12: Diagrama de proceso del tratamiento ácido para la monacita.

Fuente: (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

En un proceso desarrollado por Outotec, la calcina del proceso de digestión ácida se trata a 700 °C para recuperar el gas SO_2 y convertirlo en H_2SO_4 , el cual puede ser reutilizado en el mismo proceso. Este método, denominado Lurgi Circulating Fluid Bed (CFB) se lleva a cabo en un reactor de lecho

fluidizado. Este tipo de reactor permite integrar de manera eficiente la recuperación de calor y el tratamiento de los gases de escape. (Sadri, Nazari, & Ghahreman, 2017).

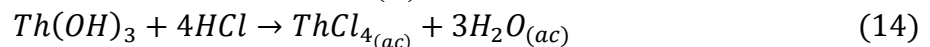
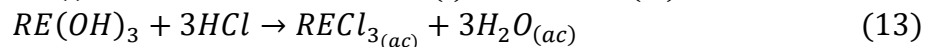
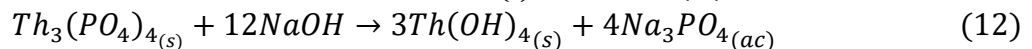
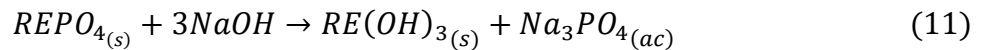
6.6.2.2 Descomposición alcalina

El método alcalino es actualmente una de las principales tecnologías de lixiviación de monacita (Peelman, Sun, Sietsma, & Yang, 2014), ya que el contenido de fósforo del mineral se recupera como fosfato trisódico (Na_3PO_4), un subproducto comercializable (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

La monacita se pone en contacto con una solución caliente concentrada de hidróxido de sodio, en una relación en peso de sólido-líquido aproximadamente 1:1 por 4 horas (Kim & Osseo-Asare, 2012). Este proceso forma hidróxidos de tierras raras y torio precipitado, más una solución de fosfato trisódico, ver ecuación 11 y 12.

Si la solución de hidróxido de sodio es al 60% el proceso se lleva a cabo a temperaturas de 150°C aproximadamente y en un autoclave y a soluciones más concentradas, como 75%, se realiza a 120°C y presiones normales (Kim & Osseo-Asare, 2012). Luego, la fracción sólida es lixiviada con una solución de ácido clorhídrico para obtener una solución de cloruros de tierras raras y cloruro de torio, ecuaciones 13 y 14. El pH se puede ajustar a un rango de 4-5 para precipitar $Th(OH)_4$ y así separar el torio de la solución de tierras raras (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024). En esta etapa se forma fosfato trisódico, subproducto que se puede utilizar como fertilizante.

El proceso de lixiviación también se puede realizar con ácido nítrico para utilizar TBP en la extracción por solventes o se puede utilizar ácido sulfúrico para lixiviar y utilizar aminas para la extracción (Peelman, Sun, Sietsma, & Yang, 2014). Los distintos ácidos utilizados pueden o no disolver en torio, por lo que si se disuelve se recomienda el proceso de extracción por solventes con aminas superiores para eliminar el torio (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Por último, la solución obtenida se puede someter a proceso de electrólisis, evaporación, cristalización y/o precipitación para obtener REO's de alta pureza.



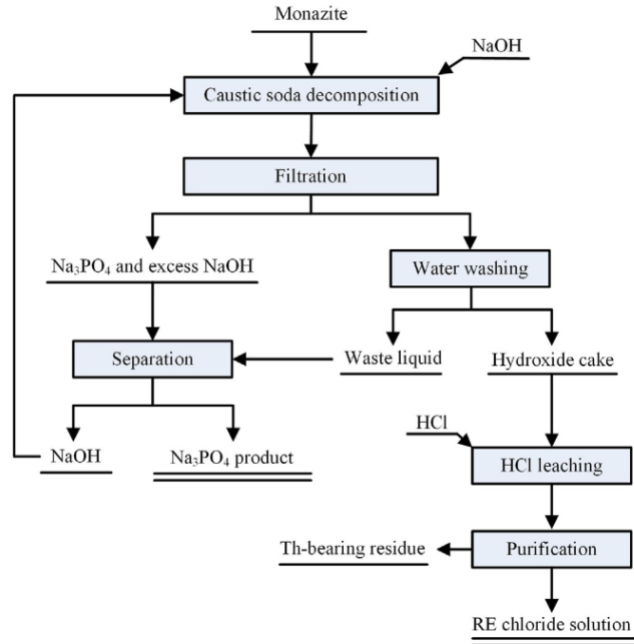


Figura 13: Diagrama de proceso de tratamiento alcalino con soda cáustica para la monacita.
Fuente: (Cheng, Li, Han, Sun, & Gao, 2024).

6.6.3 Purificación

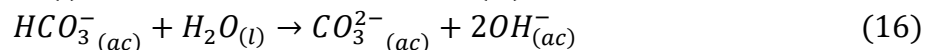
El producto obtenido tanto para el procesamiento de bastnasita y monacita es una solución concentrada de tierras raras (PLS), la operación siguiente es la purificación del PLS. Esta se realiza a través de diferentes métodos: precipitación, extracción por solventes o intercambio iónico, en este caso se va a abordar la precipitación con carbonato de sodio para formar carbonatos de tierras raras.

6.6.3.1 Precipitación con carbonato de sodio

El proceso de precipitación con carbonato de sodio es una opción más económica, sin embargo su selectividad es menor, en comparación con otros reactivos como el ácido oxálico, sin embargo no se va a revisar el proceso de precipitación con ácido oxálico.

El carbonato de sodio se disocia en agua formando las especies según las reacciones mostradas por las ecuaciones 15 y 16. Por la formación de iones hidroxilos el pH aumenta de la solución, por lo tanto, al igual que el caso anterior, se debe controlar el pH de la solución. Estudios realizados por Gomes y otros, indican que el pH óptimo es de 7 para evitar la precipitación de impurezas (Gomes Silva, Antonio Morais, Viana Teixeira, & Domingos Oliveira, 2019).

Finalmente, la precipitación de tierras raras está dada por la ecuación 17.



7 Análisis de Materias Primas

7.1 Definición de criterios

Se analiza el reporte de relaves catastrado con actualización de marzo 2023. Para determinar la materia prima se evaluaron los criterios presentados a continuación y se otorgarán valores.

- i. Estado operativo depósito: En el procesamiento de relaves es importante considerar que estos se encuentren en estado inactivo o abandonado. Puesto que, al realizar un análisis más detallado sobre su composición química, ésta no varíe en el tiempo. Entonces, si el estado operativo es:
 - Abandonado, entonces 30 puntos
 - Inactivo, entonces 20 puntos
 - Activo, entonces 10 puntos
- ii. Masa del depósito: debe ser superior a un millón de toneladas. De esta forma suponiendo un 100% de eficiencia de extracción de cobre y el parámetro e . se obtendría aproximadamente una tonelada de cobre.
 - Si $M_d \geq 100$ toneladas, entonces 30 puntos
 - Si $10 \leq M_d < 100$ toneladas, entonces 20 puntos
 - Si $M_d < 10$ toneladas, entonces 10 puntos
- iii. Concentración de tierras raras: de acuerdo con JRI ingeniería y otros (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020), la suma total de tierras raras debe ser ≥ 300 ppm. Por lo tanto, se establecen los siguientes criterios:
 - Si $\sum RE \geq 300$ ppm, entonces 30 puntos
 - Si $150 \leq \sum RE < 300$ ppm, entonces 20 puntos
 - Si $\sum RE < 150$ ppm, entonces 10 puntos
- iv. Concentración de cobre: de acuerdo con un estudio realizado por JRI ingeniería y otros (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020), la concentración de cobre debe ser > 1000 ppm. Por lo tanto, se establecen los siguientes criterios:
 - Si $Cu \geq 1000$ ppm, entonces 30 puntos
 - Si $900 \leq Cu < 1000$ ppm, entonces 20 puntos
 - Si $Cu < 900$ ppm, entonces 10 puntos
- v. Otros factores: hay otros factores se evaluarán después de aplicar los criterios indicados en los incisos i. al iv. Estos son:
 - Acceso a agua: Dada la escasez hídrica que se encuentra Chile, es de suma importancia que los recursos de agua provengan de fuentes que no afecten de forma negativa a la población cercana.
 - Acceso a agua desalada alto costo 10 puntos
 - Acceso a agua desalada bajo costo 30 puntos
 - Disposición de residuos: dado que el procesamiento de relaves generará residuos, es importante que haya espacios para disponer de ellos y que no se encuentren a grandes distancias para no incurrir en mayores gastos.
 - Sin posibilidad de disponer residuos a los alrededores 10 puntos

- Con posibilidad de disponer residuos a los alrededores 30 puntos
- Factores comunitarios: este criterio está relacionado tanto a comunidades cercanas que puedan ser parte del proyecto otorgando trabajos como las facilidades de hospedaje de los trabajadores.
 - Problemas socioambientales con comunidades aledañas 10 puntos
 - Sin problemas socioambientales con comunidades aledañas 30 puntos

7.2 Resultados preliminares

Aplicado los filtros se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 13: Resultados obtenidos luego de aplicado los criterios para selección de relaves.

IDQ	Empresa o Dueño	Faena	Depósito	Masa (Mt)	Estado	Región	Cu (g/t)	TR (g/t)	Puntaje
1592	Minera Escondida LTDA.	Escondida	Hamburgo	480	Inactivo	II	1911	176,83	100
238	Minera Valle Central S.A.	El Teniente	Cauquenes	364	Inactivo	VI	1337	117,3	90
688	Codelco	Andina	Los Leones	195	Inactivo	RM	1398	128,04	90
701	Anglo American	El Soldado	Tranque 4	80	Inactivo	VI	1758	191,49	90
157	Codelco	Salvador	Potrerosillos	75	Inactivo	III	2673	193,72	90

Para poder determinar el depósito a utilizar se evaluará uno por uno los criterios del inciso v, donde el más importante es el acceso a agua.

- i. El tranque Hamburgo representa una buena opción, ya que obtiene la nota máxima según los criterios evaluados. Sin embargo, esta mina ya opera con agua desalinizada, la cual se transporta desde Puerto Coloso, ubicado a 180 km de distancia y con una diferencia de altitud de 3.100 msnm (Figura 14). Dado que el proceso requiere de agua, aumentar el flujo de agua desalada podría traducirse en altos costos de inversión y un incremento en los costos operacionales. En cuanto a la disposición de residuos, no existen mayores impedimentos, ya que no hay comunidades cercanas que puedan verse afectadas, por lo que tampoco se anticipan conflictos significativos con las comunidades.



Figura 14: Ubicación minera Escondida y Puerto Coloso.

Fuente: Google Earth

- ii. El tranque Cauquenes (Figura 15) ya se encuentra siendo procesado por la empresa Minera Valle Central. No obstante, si analizamos los criterios del inciso v. se puede decir que el procesamiento de relaves va a generar otros residuos industriales y se corre el riesgo de conflictos sociales con las comunidades cercanas.



Figura 15: Depósito Cauquenes.

Fuente: Google Earth

- iii. Con respecto al tranque Los Leones, se encuentra en medio de la cordillera, Figura 16, y la División Andina utiliza agua proveniente del Río Aconcagua y de otras fuentes subterráneas. Sin embargo, la disponibilidad de agua es cada vez más reducida por las sequías del sector y de acuerdo con el Código de Aguas el acceso al agua potable es un derecho humano que debe ser garantizado por el Estado. Por lo tanto, reprocesar el relave traería conflictos sociales o una gran inversión para producir agua desalada, dado que el

puerto más cerca es el Puerto de Valparaíso que se encuentra a 120 km con una diferencia de altitud de 3.000 msnm.



Figura 16: Depósito Los Leones.

Fuente: Google Earth

- iv. La minera El Soldado utiliza agua de fuente subterráneas con una alta competencia en la zona, por la agricultura. Por otro lado, en comparación con los otros depósitos evaluados, se encuentra más cerca de la costa, a 70 km con una altitud de 1.700 msnm, Figura 17. A diferencia de los otros depósitos, Anglo American está construyendo una planta para producir agua desalada y ser utilizada en la minera Los Bronces, la cual podría representar una oportunidad para obtener agua desde otras fuentes y evitar los conflictos por este recurso con las comunidades aledañas. Además, dentro de la misma mina se encuentran otros dos depósitos de relaves con sus composiciones conocidas, aumentando al disponibilidad de materias primas y al estar cercas disminuyen los costos operacionales. Por último, la mina se encuentra en la cordillera de la costa lo que puede favorecer la disposición de los relaves generados en el proceso.



Figura 17: Depósito Tranque N°4, Mina El Soldado.

Fuente: Google Earth

- v. El depósito Potrerillos pertenece a División Salvador de Codelco y se encuentra en la Región de Atacama. La plata utiliza agua desde fuentes subterráneas, enfrentando problemas con la disponibilidad debido a la aridez de la zona. Debido a su ubicación en la cordillera no presenta impedimentos sociales ni ambientales para la disposición de relaves. Además, producto de la actividad minera se fundó la ciudad El Salvador, la cual se vería beneficiada al construir una nueva planta de procesamiento de minerales.



Figura 18: Depósito Potrerillos, División Salvador Codelco.

Fuente: Google Earth

Resumiendo todos los aspectos abordados de los depósitos se crea la tabla a continuación, donde el depósito con mayor puntaje es Tranque 4.

Tabla 14: Segunda matriz de selección de depósitos.

Depósito	Acceso agua	Disposición de residuos	Factores comunitarios	Puntaje total
Hamburgo	10	30	30	70
Cauquenes	30	10	10	50
Los Leones	10	30	30	70
Tranque 4	30	30	30	90
Potrerrillos	10	30	30	70

7.3 Resultados

El Soldado es una mina de cobre ubicada en la Cordillera de El Melón, comuna de Nogales, Región de Valparaíso, a 125 kilómetros al norte de Santiago. En el mismo sector, además de la minería, coexisten otras actividades productivas como la agroindustria, la pequeña agricultura familiar campesina y el turismo (Anglo American, 2024).

En la mina hay cinco depósitos de relaves, Tabla 15, de los cuales cuatro se encuentran en estado inactivo. Y entre ellos suman un total de 86 millones de toneladas. Y considerando todos los suma un total de 267 millones de toneladas.

A pesar de que todos pertenezcan a la misma mina, la composición de los elementos de interés varía en cada uno. Analizando el cobre, en el depósito Torito tiene una concentración de cobre cien veces más pequeña en comparación a los otros, ya que los procesos hoy son cada vez más eficientes. Por otro lado, no se puede decir lo mismo de las tierras raras, ya que estas en el procesamiento de cobre son un residuo. Por lo tanto, no se puede hablar de una tendencia o relación entre la concentración de las tierras raras en los depósitos en cuestión.

Tabla 15: Especificaciones de interés depósitos ubicados en El Soldado.

Depósito	Masa (t)	Estado	Cu(g/t)	Suma de TR (g/t)
Tranque 4	80.250.000	Inactivo	1758	191,49
El cobre 1	3.525.000	Inactivo	8973	175,55
El cobre 2	1.500.000	Inactivo	5164	159,06
El cobre 3	1.500.000	Inactivo	3992	82,06
Torito	181.000.000	Activo	652	138,41

Como se mencionó anteriormente, la operación de El Soldado depende actualmente de agua proveniente de pozos subterráneos. Para asegurar la disponibilidad de agua para el proceso, se propone extender una tubería desde la infraestructura que abastecerá a Los Bronces.

A partir de 2025, la compañía dispondrá de un suministro de 500 L/s de agua desalinizada proveniente de la planta de desalinización que Aguas Pacífico (controlada por Patria Investments) está construyendo en el borde costero de la bahía de Quintero-Puchuncaví, en la Región de Valparaíso. Esta planta cubrirá más del 45% de los requerimientos hídricos de la operación de Los Bronces y también abastecerá a las comunidades de Colina y Tiltil.

El agua desalinizada será transportada desde la costa mediante tuberías hasta el sector de Las Tórtolas, en la comuna de Colina, donde se inyectará al sistema de agua recirculada de Los Bronces. Además, esta etapa contempla el suministro de agua desalinizada a los Sistemas de Agua Potable Rural (APRs) en las comunidades de Colina y Tiltil, contribuyendo así a la seguridad hídrica de unas 20 mil personas.

De acuerdo con la empresa Aguas Pacífico, en la Figura 19, en color azul, se observa el acueducto que va desde la costa hasta Quilapilún, incluyendo cinco estanque de distribución, en Puchuncaví, Quillota, La Dormida, Til Til y Quilapilún (Aguas Pacífico, 2024). Desde Quilapilún se construirán tuberías adicionales que se extenderán hasta el tranque Las Tórtolas.

Para abastecer de agua a la mina El Soldado, se proponen dos posibles tramos. El Tramo 1 se extiende desde la bahía hasta la Mina, atravesando la cordillera de la costa con una extensión en línea recta de 33,5 km. Sin embargo, puede ser una opción muy invasiva tener que construir en la cordillera. Por lo tanto, se sugiere el Tramo 2, que iría aproximadamente desde Quillota hasta la planta, bordeando la Ruta 60 y cruzando la Ruta 5 Norte, con una extensión en línea recta de 28 km.



Figura 19: Ubicación planta desaladora respecto de mina El Soldado y Los Bronces.

Fuente: Google Earth

Por último, en cuanto a la disposición de los residuos mineros el sitio para disponer los relaves debe contar con un suelo competente, características de impermeabilidad y un relieve que permita construir un muro de contención seguro. Esto asegura un confinamiento adecuado, evitando el contacto del relave con los ecosistemas y protegiendo a las comunidades cercanas. Las localidades de El Navío al noreste, Chamisal y El Melón al suroeste están a menos de 5 km de la mina; por tanto, el relave debería ubicarse al este para evitar impactos, Figura 20.

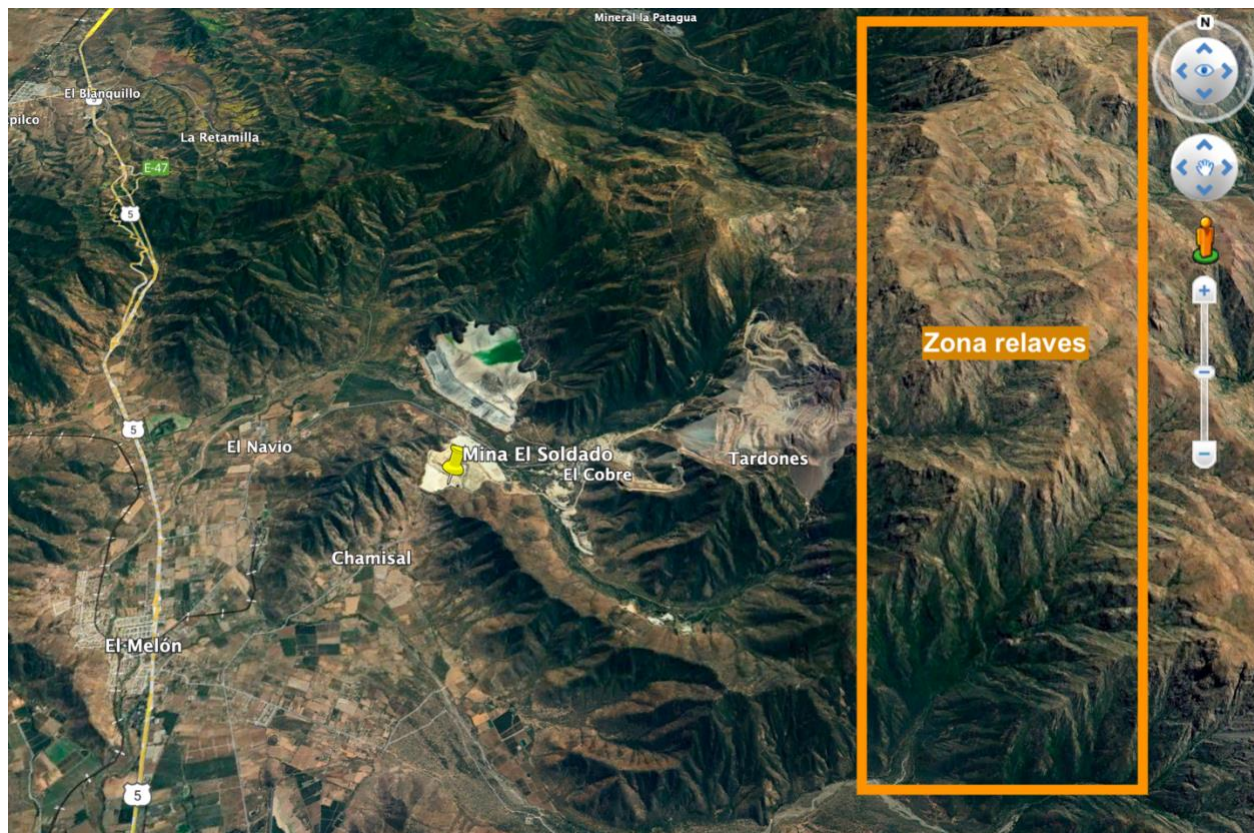


Figura 20: Ubicación depósito de relaves.

Fuente: Google Earth.

8 Diseño de proceso

Para diseñar un proceso adecuado de procesamiento de relaves, es fundamental realizar caracterizaciones químicas y físicas detalladas. Aunque la base de datos del Sernageomin proporciona la composición química general del relave, esta información no es suficiente para optimizar la extracción de metales de manera eficiente.

Por lo tanto, dado que no se dispone de información específica sobre los minerales portadores de tierras raras en los relaves, se asumirá que estas se encuentran predominantemente en forma de monacita y, en menor medida, de bastnasita. Asimismo, dado que el relave proviene de procesos de concentración de cobre, se considerará a la calcopirita como la especie representativa de este metal.

Entonces, para el diseño del proceso a continuación se justifica la selección de cada operación revisada en la sección anterior. Luego, se establece el nivel de producción, se presenta el diagrama de proceso junto con la descripción de este y el listado de equipos.

8.1 Selección remoción relave

La humedad de los relaves no es un dato conocido, en consecuencia, se va a suponer que los depósitos El Cobre 1, 2, 3 y Tranque 4, son depósitos secos, por ende, se propone removerlos por cargador y camión. Tampoco es conocido la humedad el depósito Torito, y al estar activo se

recomienda analizar una opción de remoción. No obstante, en este caso se simplificará y se tratarán todos los depósitos como secos.

Este método requiere de rutas de transporte para evitar accidentes y control de la generación de polvo mediante regado.

También, es necesario un espacio para almacenar la pila de mineral. No obstante, no se abordará el diseño de esta instalación en la planta.

Para determinar un ritmo de remoción hay que considerar:

- Tamaño del camión en toneladas,
- Ciclo de operación, que incluye: tiempo carga, descarga traslado ida y vuelta.

De esta forma se determina cuantos ciclos puede hacer un camión para determinar el número de camiones que se requiere por día. Este cálculo no se realiza, ya que se tiene la información del costo de remoción de relaves por camión y pala.

8.2 Molienda

Para la molienda se propone uno de molino de bolas en conjunto con una batería de hidrociclones en un circuito cerrado.

8.3 Selección operaciones etapa de Beneficio

Para la concentración física se propone:

1. Concentración gravimétrica: Dado que los relaves están compuestos principalmente por minerales de silicio, los cuales tienen una gravedad específica baja en comparación con los minerales de interés, se optará por utilizar la concentración gravimétrica como la primera etapa de separación física. El equipo a emplear será el separador espiral, que es el que utiliza menos agua. Su principio de funcionamiento se basa en la utilización de una corriente de agua que genera un movimiento en espiral. Debido a la diferencia en la gravedad específica de las partículas, las más pesadas (minerales de interés) se desplazarán hacia la parte interna de la espiral, mientras que las partículas más ligeras (ganga) se desplazarán hacia el exterior, permitiendo la separación (Castro Bravo, 2022).
2. Flotación: Se propone flotación de cobre y luego de tierras raras. Esta técnica es ampliamente utilizada en Chile por lo que su implementación no es compleja. No obstante, en el caso de que la mayor fracción extraíble de tierras raras se encuentre en la fracción fina del relave, se recomienda buscar información sobre el procesamiento de ultrafinos.

Se descarta la separación electrostática, ya que requiere de un gran suministro energético para secar la corriente a procesar. También se descarta la separación magnética, ya que, a pesar de su concentración, muchas veces la calcopirita se encuentra asociada a la pirita, por lo tanto, sí es removida, puede disminuir la producción de concentrado de cobre.

8.4 Selección operaciones para etapa de Hidrometalurgia

Para determinar entre tratamiento alcalino o ácido se va a evaluar: disponibilidad de reactivos, impacto ambiental, costos y la ley de los elementos de interés, en el caso de las tierras raras es de 0,02% y para el cobre es de 0,18%.

Tabla 16: Matriz de comparación tratamiento alcalino versus ácido.

	Tratamiento Alcalino	Tratamiento Ácido
Ley	Es más utilizado en procesamiento de monacitas de alto grado.	Técnica utilizada típicamente en yacimientos de baja ley.
Disponibilidad de insumos de proceso	No hay productores de este reactivo en Chile.	Producto de la actividad del cobre, Chile es uno de los mayores productores de ácido sulfúrico. Esto representa una ventaja, ya que se reducen los costos logísticos.
Impacto ambiental	Trabajar con soda caustica implica riesgo de contaminación de aguas, en caso de derrame hay corrosión en el suelo y ecosistemas y produce reacciones Otro factor, son los productos de reacciones químicas. En este método se forma fosfato trisódico (Na_3PO_4), producto comercializable utilizado como ablandador de agua, en detergentes, en pastas de dientes y se usa como decapante de pinturas (NJ Gov Health, 2006). Además, posee efectos agudos sobre la salud.	La digestión con ácido sulfúrico forma gas SO_2 , un contaminante, sin embargo, gracias al proceso Lurgi Circulating Fluid Bed (CFB) es posible recuperar los gases de óxidos de azufre.
Costos de equipos principales	Los reactivos alcalinos son corrosivos pero menos en comparación con los ácidos, Por lo tanto, los materiales utilizados en los equipos pueden ser menor costos.	El reactor donde se lleva a cabo el proceso debe ser de un material altamente resistente a la corrosión. Por lo tanto, se elevan los costos.

Se puede concluir que el tratamiento ácido es el que ofrece mayor flexibilidad para el tratamiento de minerales de tierras raras. Además, Chile posee la ventaja de ser productor de ácido sulfúrico, dada la actividad de cobre del país, lo que podría significar en menores costos de suministros. Por lo tanto, se elige el tratamiento ácido con ácido sulfúrico.

8.5 Descripción y etapas del proceso

El proceso para la producción de carbonato mixto de tierras raras y concentrado de cobre consta de cuatro etapas principales, Figura 3: remoción del material, molienda, beneficio e hidrometalurgia.

- **Remoción del material:** Se llevará a cabo utilizando camiones y cargadores, que transportarán el material hasta la pila de acopio desde donde se alimentará al proceso de molienda. Además, esta etapa considera la cinta de transporte de la pila hasta los molinos.

- **Molienda:** En esta etapa, el mineral se someterá a un proceso de molienda. El objetivo es reducir el tamaño del mineral hasta un nivel adecuado que permita la liberación de los minerales de interés de la ganga, lo que optimizará las etapas posteriores del proceso.
- **Beneficio:** Esta etapa consiste en un conjunto de operaciones unitarias diseñadas para separar físicamente la ganga de los minerales valiosos. Incluye separación gravimétrica, flotación de cobre, flotación de tierras raras y sedimentación, esta última destinada a recuperar el agua del proceso para su reutilización.
- **Hidrometalurgia:** En esta etapa final, los minerales concentrados pasan por un proceso químico en el cual las tierras raras pasan de fase sólida a líquida mediante reacciones químicas. Finalmente, se realiza una precipitación para obtener el producto final en forma de carbonato mixto de tierras raras.

8.6 Nivel de producción

El nivel de producción se establece de acuerdo con el total de toneladas de los relaves que se encuentran en la mina, y se distribuye el procesamiento en 10 años considerando una tasa de crecimiento anual compuesta de 4,19%. La producción en toneladas por año (TPA) se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17: Producción anual.

Periodo	Producción TPA
1	21.289.116
2	23.110.519
3	24.078.850
4	25.087.754
5	26.138.931
6	27.234.152
7	28.375.263
8	29.564.187
9	30.802.926
10	32.093.569
Total	267.775.267

Esta producción permite una producción en TPA de carbonato mixto de tierras raras y cobre mostrada a continuación:

Tabla 18: Producción en TPA por producto.

Periodo	MREC	Concentrado de cobre	Total TPA
1	7.247	168.418	175.665
2	7.867	182.827	190.694
3	8.197	190.488	198.685
4	8.541	198.469	207.010
5	8.898	206.785	215.683
6	9.271	215.449	224.720
7	9.660	224.477	234.137
8	10.064	233.882	243.946
9	10.486	243.682	254.168
10	10.926	253.892	264.818

En la producción total del año, el cobre representa el 95,87% de la producción total, siendo su participación muy significativa.

Tabla 19: Resumen de corrientes de proceso.

N° Corriente	Nombre
1	Alimentación cinta
2	Alimentación molino
3	Alimentación hidrociclón
4	Relave molido
5	Alimentación separador espiral
6	Fracción pesada
7	Alimentación flotación
8	Cola flotación cobre
9	Pulpa
10	Concentrado de tierras raras
11	Sulfato de TR
12	PLS con TR
13	PLS limpio
14	Precipitado
15	Producto
16	Agua
17	Fracción liviana
18	Recirculación
19	Agua make up
20	Agua recuperada
21	Agua flotación
22	Pre concentrado
23	Ácido Sulfúrico
24	Agua lixiviación
25	Concentrado de Cobre
26	Recirculación agua
27	Cola
28	Relaves
29	Agua
30	Carbonato de sodio
31	Agua inicio

8.8 Descripción del proceso

El proceso de la Figura 21 inicia con la recepción del material hasta la pila de almacenamiento, luego este es llevado a través de una cinta para alimentar la etapa de molienda, corriente 2. La segunda etapa es de molienda, donde mediante el uso del molino e hidrociclón las partículas tienen el tamaño correcto para ingresar a la etapa de beneficio, corriente 4.

La etapa de beneficio inicia con el separador espiral, donde la alimentación de este equipo es una corriente 40% sólido y 60% agua. La fracción liviana es eliminada por la corriente 17 y la fracción pesada continua al proceso de flotación de cobre. La corriente 18 se recupera el 95% del agua de la alimentación, por ende, hay que reponer agua en el sistema. Esta reposición es a través de la corriente 19. Antes de ingresar a la flotación de cobre, es necesario aumentar el porcentaje de agua a un 80%, proporcionado por la corriente 21 y recirculación de otras etapas aguas abajo.

El producto de flotación de cobre, corriente 22, es dirigido a un sedimentador para recuperar el agua y de esa forma obtener el concentrado de cobre al 20%, corriente 25. La cola de la flotación de cobre (corriente 8), corresponde a la alimentación de la flotación de tierras raras. En esta etapa no es necesario agregar agua ya que el porcentaje de agua en la corriente se mantiene en un 80%. Los productos de esta operación son las corrientes 27, que corresponde a la cola del proceso y la corriente 9 que corresponde al concentrado de tierras raras. En esta etapa la concentración de la tierras raras ha aumentado de 0,02% a un 0,32%. La última operación de la etapa de beneficio es el sedimentador, donde se recupera agua de proceso (corriente 20) y el lodo continúa hacia la etapa de hidrometalurgia (corriente 10).

La etapa de hidrometalurgia comienza con el cracking de tierras raras utilizando ácido sulfúrico, lo cual libera las tierras raras de la matriz que las contiene y las vuelve solubles. En esta etapa, ocurre una reacción química en la que los minerales de tierras raras, representados principalmente por la monacita (mineral fosfato), se transforman en sulfatos de tierras raras (corriente 11), los cuales son solubles en agua. A continuación, se lleva a cabo una lixiviación con agua, que disuelve las tierras raras, dejándolas en su forma iónica RE^{3+} . Luego, la solución PLS (*Pregnant Liquid Solution*) se filtra para eliminar los residuos sólidos que no se disolvieron, obteniendo así la corriente 13.

Con el PLS ya purificado, se añade carbonato de sodio (también llamado soda ash) para precipitar los iones de tierras raras en su forma carbonatada, obteniendo así una mezcla de carbonatos de tierras raras, corriente 14. Y la última etapa del proceso consiste en filtrar los sólidos para eliminar la mayor cantidad de agua posible, obteniendo los productos en la corriente 15.

8.9 Listado de equipos

En la Tabla 20 se presenta el listado de equipos, indicando su función, el área a la que pertenece y el TAG.

Las áreas están determinadas de la siguiente manera:

- Remoción de material: 100
- Molienda: 200
- Beneficio: 300
- Hidrometalurgia: 400

Además, la convención para la asignación de TAG's es: equipo-área-número de equipo.

Tabla 20: Listado de equipos.

Equipo	Función	Área	TAG
Camión tolva	Remover la materia prima	100	CT-100-01
Molino de bolas	Moler el material	200	MB-200-01
Batería de Hidrociclones	Separar por tamaño	200	HC-200-02
Separador espiral	Separar fracción pesada de la liviana	300	SP-300-01
Celdas de flotación	Flotar cobre	300	CF-300-01
Celdas de flotación	Flotar tierras raras	300	CF-300-02
Sedimentador	Sedimentar concentrado de cobre	300	SD-300-01
Sedimentador	Sedimentar cola de flotación de tierras raras	300	SD-300-02
Sedimentador	Sedimentar concentrado de tierras raras	300	SD-300-03
Autoclave	Para cracking de tierras raras	400	R-400-01
Reactor	Para lixiviación con agua	400	R-400-02
Reactor	Para precipitar las tierras raras	400	R-400-03

8.10 Balance de masa

Para realizar un balance de masa que considere solo las especies de interés se utilizará un diagrama con dos unidades: beneficio e hidrometalurgia presentado en la Figura 22.

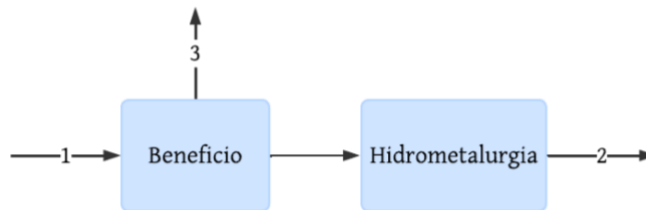


Figura 22: Diagrama para balance de masa global

La composición de los elementos de interés de la corriente de alimentación se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 21: Porcentaje en peso de las especies de interés en la corriente de alimentación.

Componente	% peso
La	0,00207%
Ce	0,00509%
Pr	0,00077%
Nd	0,00268%
Sm	0,00064%
Eu	0,00015%
Gd	0,00059%
Tb	0,00008%
Dy	0,00049%
Ho	0,00010%
Er	0,00027%
Tm	0,00004%
Yb	0,00027%
Lu	0,00004%
Y	0,00540%
Sc	0,00050%
Cu	0,17580%

Las ecuaciones que permiten realizar el balance de masa son:

$$F_{i,1} = \%peso \cdot F_1 \quad (18)$$

Donde F_1 representa el flujo de alimentación e “i” todos los elementos de la Tabla 21.

Luego, dado que la corriente 2 corresponde al carbonato mixto de tierras raras, para obtener el flujo total se la corriente se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_2 = \frac{\sum F_{i,1} \cdot \eta_{RE}}{0,45} \quad (19)$$

Donde η_{RE} es la eficiencia de extracción y 0,45 corresponde al porcentaje de pureza de tierras raras en el carbonato.

Luego la corriente 3, que corresponde a concentrado de cobre, se considera un porcentaje de eficiencia del 90%, con una concentración de cobre del 20%, entonces el flujo de la corriente 3 se calcula de la siguiente manera:

$$F_3 = \frac{F_{Cu,1} \cdot \eta_{Cu}}{0,2} \quad (20)$$

Dado que el flujo de alimentación varía, los balances se van a presentar en función de su composición porcentual. De acuerdo con la numeración de las corrientes en la Figura 21, los balances de masa de la etapa de remoción, molienda, beneficio e hidrometalurgia se observan en Tabla 22 Tabla 23 y Tabla 24. Para conocer el detalle de los cálculos ver Anexo A y

Anexo B.

Tabla 22: Balance de masa etapa remoción y molienda.

N° Corriente	1	2	3
Nombre	Alimentación cinta	Alimentación molino	Alimentación hidrociclón
Agua	0,00%	0,00%	0,00%
Ganga	99,81%	99,81%	99,81%
RE	0,02%	0,02%	0,02%
Cu	0,18%	0,18%	0,18%
Suma	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 23: Balance de masa global etapa beneficio.

N° Corriente	4	5	6	7	8	9	10	17	18
Nombre	Relave molido	Alimentación separador espiral	Fracción pesada	Alimentación flotación	Cola flotación cobre	Pulpa	Concentrado de tierras raras	Fracción liviana	Recirculación
Agua	0,00%	60,00%	32,62%	80,00%	80,00%	80,00%	20,00%	5,00%	100,00%
Ganga	99,81%	39,92%	64,85%	19,25%	19,83%	19,33%	77,33%	95,00%	-
RE	0,02%	0,01%	0,25%	0,07%	0,09%	0,35%	1,39%	-	-
Cu	0,18%	0,07%	2,28%	0,68%	0,08%	0,32%	1,28%	-	-
Suma	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Continuación Tabla 23: Balance de masa global etapa beneficio.

N° Corriente	19	20	21	22	25	26	27	28	29	31
Nombre	Agua make up	Agua recuperada	Agua flotación	Pre concentrado	Concentrado de Cobre	Recirculación agua	Cola	Relaves	Agua	Agua inicio
Agua	100,00%	100,00%	100,00%	80,00%	0,00%	100,00%	80,00%	28,61%	100,00%	100,00%
Ganga	-	-	-	16,00%	80,00%	-	19,96%	71,39%	-	-
RE	-	-	-	-	-	-	0,02%	-	-	-
Cu	-	-	-	4,00%	20,00%	-	0,02%	-	-	-
Suma	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 24: Balance de masa global etapa hidrometalurgia.

N° Corriente	11	12	13	14	15	16	23	24	30
Nombre	Sulfato de TR	PLS con TR	PLS limpio	Precipitado	Producto	Agua	Ácido Sulfúrico	Agua lixiviación	Carbonato de sodio
Agua	19,81%	32,57%	91,21%	91,21%	-	100,00%	-	100,00%	-
Ganga	76,59%	63,31%	0,18%	0,18%	25,85%	-	-	-	-
RE	1,38%	1,14%	3,20%	3,20%	-	-	-	-	-
Cu	1,27%	1,05%	0,00%	0,00%	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄	-	-	-	-	-	-	100,00%	-	-
H ₃ PO ₄	0,95%	0,78%	2,19%	2,19%	-	-	-	-	-
(SO ₄) ²⁻	-	1,15%	3,22%	3,22%	-	-	-	-	-
Na ₂ CO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00%
RE ₂ (CO ₃) ₃	-	-	-	-	74,15%	-	-	-	-
Suma	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

8.11 Dimensionamiento equipos principales

El dimensionamiento de los equipos tiene por objetivo estimar sus precios y de esa forma determinar la inversión en la sección Estimación de costos. Las especificaciones se calculan en función de la máxima capacidad de la planta. A continuación, se muestra el dimensionamiento de los equipos principales.

Tabla 25: Dimensionamiento equipos principales

TAG	Caudal m^3/h	Densidad mezcla. ton/m^3	Área m^2	Diámetro m	Tiempo de residencia h	Volumen m^3
MB-200-01	1351	2,71	-	4	1/6	83
HC-200-01	1351	2,71	-	-	-	-
SP-300-01	5437	1,68	-	-	-	-
CF-300-01	686	1,38	-	-	0,5	343
SD-300-01	18	1,59	243	18	-	-
CF-300-02	597	1,35	-	-	1	299
SD-300-03	117	1,37	270	19	-	-
SD-300-02	479	1,34	1082	37	-	-
R-400-01	17	2,47	-	-	4	81
R-400-02	24	2,47	-	-	6	148
R-400-03	16	1,08	-	-	0,5	9

Todos los equipos están dimensionados con un sobredimensionamiento del 10% por seguridad y además todos los de hidrometalurgia deben ser de acero inoxidable.

9 Estimación de costos

En esta sección se estimará la inversión requerida para el servicio de procesamiento de relaves y los costos de operación asociados. Estos costos se dividen en tres categorías principales: los costos variables, que dependen directamente de la producción e incluyen insumos, servicios y costos ambientales relacionados con la disposición de residuos; los costos fijos, que abarcan análisis químico-ambiental, remuneraciones y mantenimiento de los equipos; y los costos técnicos, que en este caso corresponden a la depreciación de los equipos e instalaciones.

9.1 Tasa de cambio

La moneda base para la preparación de la estimación de costos es el Dólar de Estados Unidos. Todos los costos fueron convertidos a dólares y expresados en moneda de 2024.

Tabla 26: Tasa de cambio.

Dólar Estado Unidense	Pesos Chilenos
1	977,19

9.2 Estimación costos de inversión

Los costos totales se estiman de acuerdo con Peters & Timmerhaus (Peters & Timmerhaus, 1991), donde la inversión total de capital (en inglés, *TCI: Total Capital Investment*) corresponde al capital necesario para la compra e instalación de maquinaria y para el funcionamiento de la planta.

El TCI está compuesto por la suma de la inversión de capital fijo (en inglés, *FCI: Fixed Capital Investment*) y el Capital de Trabajo (en inglés, *WC: Working capital*), ecuación 21. Estos se relacionan típicamente, siendo el WC entre el 10 y 20% del TCI. Considerando el contrato tipo maquila, la relación WC y TCI es alta, Por lo tanto, se estima que una relación del 20%, por ende, el FCI será un 80% del TCI.

$$TCI = FCI + WC \quad (21)$$

El WC está compuesto por: materias primas almacenadas, productos terminados y semiterminados, cuentas por cobrar, efectivo disponible, cuentas por pagar, impuestos por pagar.

El FCI está compuesto por los costos directos, que corresponde a la inversión en activos fijos de manufactura y costos indirectos, que no están relacionados con la manufactura. Para el proyecto el FCI está compuesto por lo observado en la Tabla 27.

Tabla 27: Desglose de inversión de capital fijo (FCI)

Costos directos	%FCI
Equipos comprados	40%
Instalación de equipos	6%
Instrumentación y control	3%
Instalación tuberías (piping)	7%
Eléctrico instalado	5%
Edificios	7%
Mejoras de terreno	3%
Instalaciones de servicios	8%
Terreno	1%
Costos indirectos	%FCI
Ingeniería y supervisión	6%
Gastos de construcción	2%
Honorarios de contratista	2%
Contingencia	10%

9.2.1 Equipos comprados

Para estimar el costo de los equipos comprados se utilizan como apoyo un estudio realizado por (Campos Ordaz, 2015), para los equipos de la etapa de molienda y beneficios y para las etapas de hidrometalurgia se utiliza la herramienta de *Matche's Process Equipment Cost Estimates*. El resumen se observa en la Tabla 28.

Tabla 28: Costo equipos comprados

Equipo	Unidades	Costo unitario USD	Costo
Batería de ciclones	10	\$170.208	\$1.702.079
Molinos de bolas	4	\$6.142.619	\$24.570.476
Modulo separador espiral	75	\$50.000	\$3.750.000
Celdas	88	\$170.473	\$15.001.646
Sedimentador	1	\$27.395.384	\$27.395.384
Autoclave	1	\$1.035.786	\$1.035.786
Reactor de lixiviación	1	\$1.427.139	\$1.427.139
Reactor de precipitación	1	\$252.700	\$252.700
Total			\$75.135.210

Para un análisis de estos costos se construye un gráfico de torta, Figura 23, en donde se observa que los mayores costos corresponden a la planta de agua con un 36,5% del total. Esto se debe principalmente porque esta planta considera sedimentadores. En segundo lugar, la etapa de molienda con un total de 35%, con un altos costos en molinos de bolas. Tercer lugar la etapa de beneficio con un 25% del total y por último la etapa de hidrometalurgia con 3,6%, esta etapa representa costos menores ya que aguas abajo los caudales de tratamiento van disminuyendo por ende el tamaño de los equipos también.

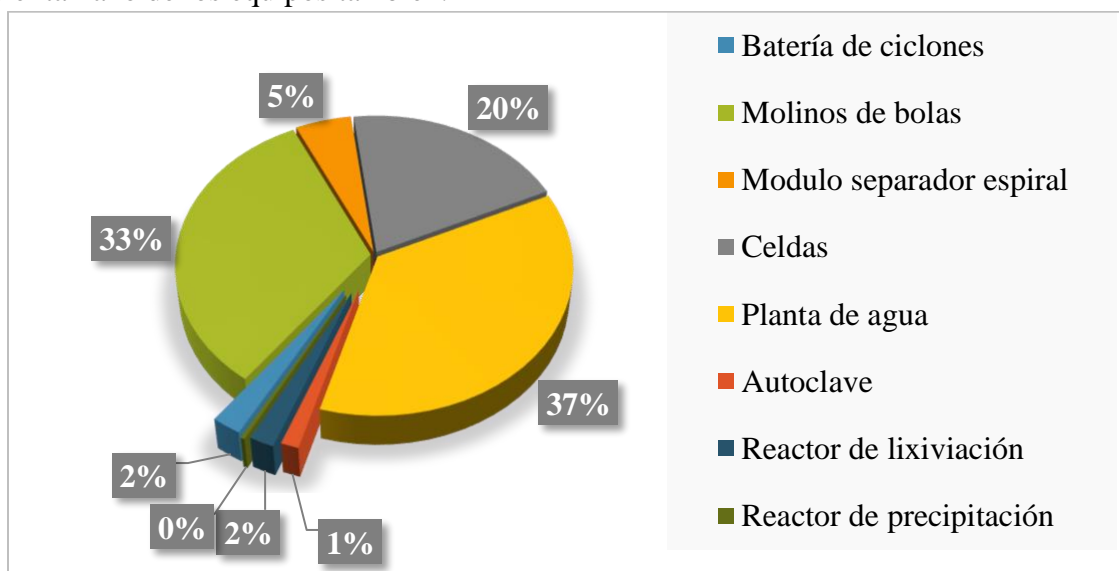


Figura 23: Distribución de costo por equipos.

Estimado el costo de los equipos, se puede estimar el total del FCI y con ello la inversión total que es de 234.797.532 USD, Tabla 29.

Tabla 29: Resumen costos de inversión

TCI	FCI	WC
-----	-----	----

100%	80%	20%
234.797.532	187.838.026	46.959.506

9.3 Estimación costos de operación

Para determinar la razón técnica se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Razón técnica} = \frac{\text{Consumo servicio TPA}}{\text{Producción TPA}} \quad (22)$$

Donde TPA es toneladas por año.

9.3.1 Costos Variables

Los costos variables corresponden a los servicios, tales como, energía eléctrica, agua y costos por remoción de relave; insumos que corresponden a los reactivos químicos para flotación, cracking y precipitación y ambiental por costos de traslado de residuos sólidos. La distribución de estos se observa en la Figura 24.

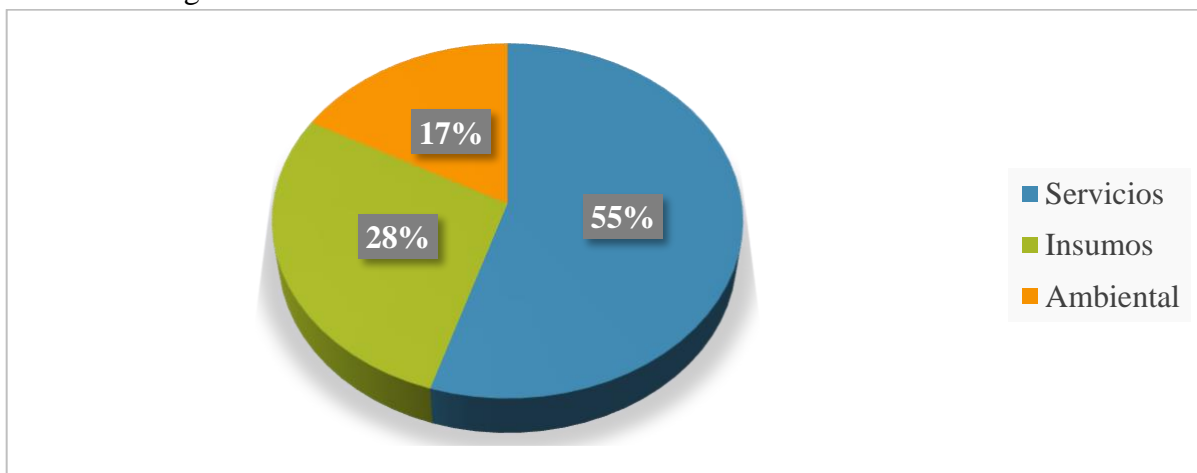


Figura 24: Distribución de costos variables.

Fuente: Elaboración propia.

Los costos más elevados en este proceso corresponden a los servicios. Dentro de estos, la remoción de relaves contribuye con un 72,03%, seguido de los costos por energía eléctrica con un 38,7% y el agua con el resto.

Dado que la producción aumenta cada año, también lo hacen los costos variables. Estos están detallados en la tabla a continuación:

Tabla 30: Costos variables anuales

Periodo	Costo variable total USD/año
1	161.691.178
2	175.342.061
3	182.599.416
4	190.160.853
5	198.039.116
6	206.247.477
7	214.799.769
8	223.710.401
9	232.994.389
10	242.667.377

9.3.1.1 Servicios

Los servicios utilizados en este proceso son: agua industrial, energía eléctrica y el uso de camiones para la remoción del relave, mostrado en la Tabla 31. Para el consumo de energía eléctrica se utiliza la planta de (Campos Ordaz, 2015) como referencia. En la Tabla 31, se muestran las razones técnicas, calculadas con la ecuación 22, las cuales permiten estimar los costos totales en función de la producción.

Tabla 31: Razones técnicas servicios.

Servicio	Razón técnica	Precio
Energía eléctrica	$10,82 \frac{kWh}{Producción}$	$0,107 \frac{USD}{kWh}$
Agua	$0,065 \frac{m^3 \text{ agua}}{Producción}$	$0,06 \frac{USD}{m^3}$
Camión y pala	-	3 USD/ton

El uso de camión y pala constituye el mayor costo unitario de los costos variables, por ende, también representa el mayor costo por tonelada anual, con un 72,03% de los costos por servicio.

9.3.1.2 Energía eléctrica

Tomando como referencia el diseño de la planta de (Campos Ordaz, 2015) y las capacidades de la planta en cuestión, se determina una potencia de 26,306 MW.

Dado que la producción aumentará todos los años, también lo hará la demanda energética, como se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 32: Consumo de energía por periodo

Periodo	Demanda MW	Consumo MWh/año
1	26,306	230.441
2	28,56	250.156
3	29,75	260.638
4	31,00	271.558
5	32,30	282.937
6	33,65	294.792
7	35,06	307.143
8	36,53	320.013
9	38,06	333.421
10	39,66	347.392

9.3.1.3 Agua

El agua fresca se calcula como el agua de proceso menos el agua recirculada. Resultando una razón técnica de $0,065 m^3/h$. Dado que la producción aumenta todos los años el consumo de agua también. Este se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 33: Consumo de agua por año.

Periodo	Consumo m^3
1	1.377.383
2	1.499.712
3	1.564.747
4	1.632.507
5	1.703.106
6	1.776.663
7	1.853.302
8	1.933.153
9	2.016.349
10	2.103.031

Además, el consumo de agua por tonelada de productos es de $10 m^3/ton$.

9.3.1.4 Remoción por camión con cargador

De acuerdo con los establecido por JRI Ingeniería (JRI Ingeniería S.A. & EcoMetales Limited, 2020), el costo de la remoción de relave con cargador y camión es de 3 USD/ton.

9.3.1.5 Insumos

Los insumos utilizados en este proceso corresponden a reactivos de flotación, lixiviación y precipitación. Para su cálculo se utilizaron distintos estudios como referencia. Para aquellos que

fueron calculados con los datos del proyecto en cuestión, se utilizó la ecuación de razón técnica. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 34: Razones técnicas de insumos.

Proceso	Insumo	Razón técnica ton/ton	Referencia
Cracking de tierras raras	Ácido sulfúrico	0,0008	Elaboración propia
Precipitación	Bicarbonato de sodio	0,0003	Elaboración propia
Flotación de cobre	Colector: PAX	0,00004	(Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018)
Flotación de cobre	Espumante: MIBC	0,00003	(Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018)
Flotación de cobre	Activador: Sulfato de cobre	0,0001	(Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018)
Flotación de cobre	Depresor: NaHS	0,0002	(Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018)
Flotación tierras raras	Colector: Ácido oleico	0,001	(Abaka-Wood, Addai-Mensah, & Skinner, 2016)
Flotación tierras raras	Depresor: Silicato de sodio	0,001	(Abaka-Wood, Addai-Mensah, & Skinner, 2016)
Flotación tierras raras	Espumante: MIBC	0,00003	(Valderrama, Gonzalez, Santander, & Zazzali, 2018)

9.3.1.6 Ambiental

Puesto que esta actividad genera residuos sólidos como desechos, es importante considerar su disposición final. La razón técnica se estima en $1 \text{ ton}/\text{producción}$ y los costos se asumen similares a un estudio realizado por Cox y otros (Cox, Innis, Mortaza, Kunz, & Steen, 2024), donde se estima un costo de 1,29 USD/tonelada de cola (*Tailings*).

9.3.2 Costos Fijos

En este proyectos los costos fijos están dados por análisis químico ambiental, para monitorear los impactos ambientales asociados a las operaciones mineras y garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales, mantención de los equipos y pago de remuneraciones. Estos costos suman un total de 17.784.669 USD/año, detallados continuación:

Tabla 35: Resumen costos fijos

Costo	Costo USD/año
Análisis químico ambiental	1.373.148
Mantención	7.513.521
Remuneraciones	8.898.000

El análisis químico ambiental se estima en un 5% de los costos ambientales. Y la mantención un 5% del FCI.

La distribución de costos se observa en la Figura 25, en donde el mayor costo está dado por las remuneraciones.

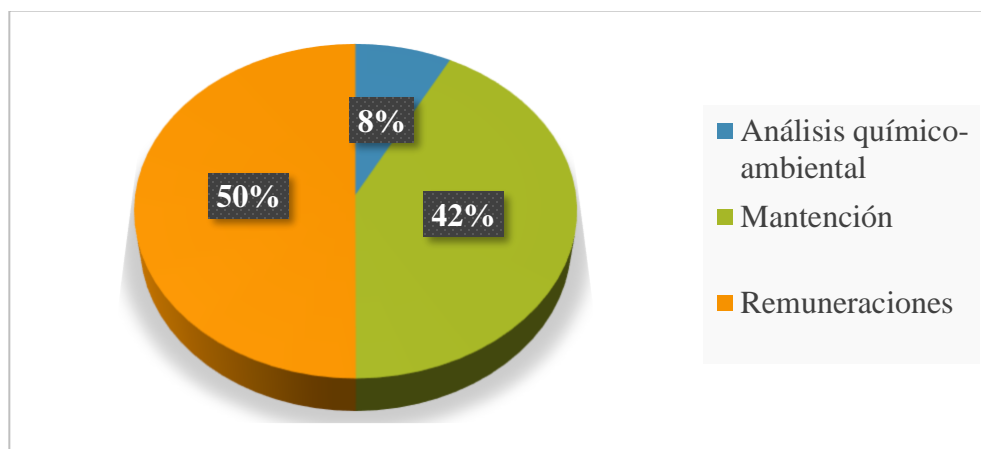


Figura 25: Distribución de costos fijos.

9.3.3 Remuneraciones

Los cargos se estiman en función del estudio realizado por Campos (Campos Ordaz, 2015). El costo anual se presenta en la Tabla 36. El criterio utilizado para asignar valores establece que los cargos masivos se asocian a sueldos más bajos, mientras que los cargos individuales se consideran de mayor remuneración, dado que implican mayores responsabilidades.

Tabla 36: Costo por remuneraciones.

Cargo	N° personas	Sueldo bruto USD/mes	Sueldo USD/año
Gerente general	1	15.000	180.000
Gerente operaciones	1	10.000	120.000
Superintendente de operaciones	1	7.000	84.000
Jefe de turno	3	4.500	162.000
Ingeniería y desarrollo	10	3.000	360.000
Recursos humanos	10	3.000	360.000
Operaciones	200	2.000	4.800.000
Mantenimiento	80	2.000	1.920.000
Contabilidad y finanzas	10	3.000	360.000
Sustentabilidad	2	5.000	120.000
Seguridad, ambiente y calidad	12	3.000	432.000
Total organización	330	Total año	8.898.000

9.3.4 Costos Técnicos

En este caso los costos técnicos corresponden a la depreciación. Esta se estima para los equipos en un el 9%, considerando un valor residual del 10%, y un 2% para los edificios. Como resultado, la depreciación anual es de 6.348.925 USD/año.

10 Aspectos legales ambientales

10.1 Disposición residuos radioactivos

La producción de tierras raras a partir de mineral de monacita implica diseñar el manejo del torio y el uranio, ambos residuos radioactivos. Por lo tanto, hay un costo asociado con su adecuada gestión y disposición final. En este caso, los depósitos a procesar presentan concentraciones de torio y uranio que varían entre 0,0001% g/t y 0,00082% en peso, y entre 0,00004% y 0,00022% en peso, respectivamente. En conjunto, estas concentraciones pueden llegar a representar el 0,5% del total de tierras raras e incluso mucho menos en comparación con el cobre. Por lo tanto, no se va a diseñar un proceso para su disposición final. Sin embargo, un proceso comúnmente utilizado para separar el torio y el uranio de las tierras raras a partir de productos como el carbonato de tierras raras es la lixiviación con ácidos nítrico, clorhídrico o sulfúrico, utilizando extractantes como TBP (tributilfosfato) o aminas primarias, que tienen una alta selectividad por el torio y el uranio (Yong Cheng, Pranolo, & Zhu, 2015).

10.2 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)

La Ley N° 19.300 (Ley de Bases Generales del Medio Ambiente) establece el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.

En el artículo 10, se indican los proyectos o actividades que deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental que son susceptibles a causar impacto ambiental en cualesquiera de sus fases. Entonces, bajo el inciso i) de proyectos de desarrollo minero y bajo lo indicado en el artículo 11 letra a), el proyecto debe presentar un Estudio de Impacto Ambiental al SEIA.

10.3 Normativa aplicable a los relaves mineros en Chile

- **Ley N°18.248:** Establece el Código de Minería, que constituye la base legal para las concesiones mineras en Chile. En el artículo 6 se señala que, si la pertenencia minera se extingue o el establecimiento es abandonado, se puede constituir una concesión minera sobre las sustancias minerales concesibles contenidas en los desmontes, relaves o escorias, siempre que estos se encuentren en terrenos abiertos y accesibles (BCN, 1983).
- **Ley N°18.087:** Es la Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras. Regula el derecho a obtener concesiones mineras y establece los derechos, obligaciones, duración y causas de extinción de las concesiones de los concesionarios mineros (BCN, 2024).
- **Decreto supremo N°248:** Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierres de los depósitos de relaves. Este decreto tiene como objetivo establecer las normas y procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves, garantizando la seguridad de las personas y la protección del medio ambiente (Ministerio de Minería, 2007).

10.4 Normativas aplicables a las faenas mineras

- **Decreto 132:** Establece el reglamento de seguridad minera, cuyo objetivo es regular las normas y disposiciones a las que deben someterse las faenas de la industria extractiva minera nacional. Abarca las etapas de exploración, explotación, transporte y procesamiento de minerales, con el fin de proteger la vida e integridad física de los trabajadores, así como las instalaciones e infraestructura de las mineras, garantizando la continuidad de los procesos (BCN, 2004).
- **Decreto supremo N°148:** regula el manejo de residuos peligrosos generados en actividades industriales, estableciendo normas mínimas de seguridad y condiciones sanitarias para su gestión. Esto incluye la generación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos como sustancias tóxicas, inflamables, corrosivas o infecciosas, con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente (BCN, 2004)
- **Ley 20.551:** Regulación de cierre de faenas mineras. Esta ley regula el proceso de cierre de faenas e instalaciones mineras en Chile, el cual debe ser ejecutado por la empresa minera antes del término de sus operaciones y debe ser aprobado por el Sernageomin previo al inicio de las operaciones mineras. El objetivo es mitigar los impactos ambientales derivados de las actividades extractivas. Además, establece que el plan de cierre es parte del ciclo de vida útil de la faena y debe ser planificado e implementado de forma progresiva (BCN, 2011)
- **Decreto 41:** Aprueba el Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, estableciendo normas para regular el cierre de faenas e instalaciones mineras (BCN, 2020).
- **Decreto con Fuerza de Ley N°1.122:** establece el Código de Aguas de Chile, que regula el uso, aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos en el país, definiendo los derechos de agua, mecanismos para su obtención y transferencia (BCN, 1981). En el año 2022, el código fue reformado mediante la Ley N°21.435, que reconoce el acceso al agua y saneamiento como un derecho humano esencial e irrenunciable, que debe ser protegido por el estado. Debido a esta reforma, cuando exista competencia por los recursos hídricos, la industria deberá ajustar sus operaciones (BCN, 2022). En particular, los artículos 294 y siguientes regulan la construcción de obras hidráulicas y se refieren a las facultades del Director General de Agua para garantizar la seguridad de las obras hidráulicas, siendo necesario suspender su construcción o funcionamiento si estas representan un riesgo (BCN, 1981).
- **Decreto 50:** Reglamento obras públicas mayores. Este reglamento establece las condiciones técnicas que deben cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del Código de Aguas (BCN, 2015).

11 Evaluación económica

11.1 Bases de la evaluación económica

Para esta evaluación económica, se adopta un esquema de contrato tipo maquila. Bajo este modelo, la producción de concentrado de tierras raras y cobre será propiedad del cliente, en este caso, Anglo American. Este enfoque presenta la ventaja de que la inversión y la operación son realizadas por

un tercero, reduciendo el riesgo financiero para el cliente. En este modelo, el pago al tercero incluye una tarifa por el servicio de procesamiento y por el valor del elemento valioso.

Además, dado que el contrato es de tipo maquila las materias primas, que en este caso corresponden al relaves, no son consideradas un costo operativo.

En análisis económico se llevará a cabo mediante casos para determinar de forma numérica cual es el mejor caso.

Las bases de la evaluación económica serán:

- Tasa de descuento: Se utiliza una tasa del 14% para proyectos mineros, de acuerdo con el Ministerio de Hacienda (Hacienda, 2023).
- Período de evaluación: Se considera un horizonte de 10 años, debido a la naturaleza limitada de las reservas.
- Tarifa de venta del concentrado de cobre al 20%: Corresponde a la tarifa que ENAMI paga a la pequeña minería, que es de 1.483 USD/ton (ENAMI, 2024).

11.2 Supuestos

Los supuestos de la evaluación económica son:

- Ley de cobre: 0,18%,
- Ley de tierras raras: 0,02%,
- Error de la inversión de $\pm 40\%$,
- Sin variación en los costos unitarios de los servicios en el tiempo,
- Costos por remoción de relave con camión y pala 3 USD/ton,
- Eficiencia de recuperación de tierras raras 80%,
- Eficiencia de recuperación de cobre 90%.

11.3 Análisis económico

El análisis económico del servicio de procesamiento de relaves consiste en evaluar diferentes casos:

- **Caso 1:** Evaluar la rentabilidad económica del servicio de procesamiento de relaves, considerando únicamente la producción de concentrado de cobre. En este escenario, no se incluyen los costos de inversión ni operación asociados a los procesos específicos para tierras raras. Este corresponde al caso base
- **Caso 2:** Evaluar la rentabilidad económica del servicio de procesamiento de relaves, determinando la tarifa mínima de venta del MREC para alcanzar un VAN=0.
- **Caso 3:** Determinar la tarifa del carbonato mixto de tierras raras que permita recuperar la inversión en 3 años. Este caso evalúa la rapidez para generar retornos, siendo clave para inversores interesados en minimizar riesgos financieros.
- **Caso 4:** Analizar la rentabilidad económica si Anglo American realiza el procesamiento de sus propios relaves, eliminando la participación de una empresa maquiladora. Este enfoque considera los precios de mercado tanto para el concentrado de cobre como para el carbonato mixto de tierras raras, permitiendo comparar la rentabilidad bajo diferentes esquemas operativos y determinar si es más conveniente externalizar o internalizar el procesamiento.

- **Caso 5:** Determinar la tarifa del carbonato mixto de tierras raras y evaluar la rentabilidad del servicio de procesamiento de tierras raras. Este caso ayuda a entender si la rentabilidad global del proyecto mejora significativamente al incorporar el procesamiento de tierras raras, junto con la inversión correspondiente, como producto adicional.

11.4 Resultados y análisis de casos

11.4.1 Caso 1

En este caso, se eliminan los equipos de la etapa de hidrometalurgia y se ajustan los costos de los sedimentadores. De esta forma la nueva inversión total es 197.774.345 USD. Es importante recordar que la tarifa del concentrado de cobre es de 1.483 USD/ton.

Entonces, evaluando el servicio de procesamiento de relaves solo para producir concentrado de cobre y de acuerdo con los indicadores de la Tabla 37, el servicio es rentable económicamente. Y se obtiene un periodo de pago de la inversión en el cuarto periodo.

Además, el cliente, Anglo American, tiene un margen de ganancia de 263 USD por tonelada de concentrado de cobre. Esto significa que, con una tarifa de venta al cliente de 1.483 USD/ton y un precio de venta al mercado de 1.746 USD/ton, obtiene un margen de 263 USD por tonelada de concentrado de cobre producida. Este margen se traduce en ganancias superiores a 44 millones de dólares en el primer año, alcanzando hasta más de 66 millones de dólares en el último periodo.

Tabla 37: Indicadores económicos caso 1.

VAN USD	146.839.741
TIR	29%

INGRESO	UNIDADES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRODUCCIÓN	TPA		21.289.116	23.110.519	24.078.850	25.087.754	26.138.931	27.234.152	28.375.263	29.564.187	30.802.926	32.093.569
INGRESOS POR COBRE	US\$/AÑO		249.763.894	271.132.441	282.493.704	294.329.527	306.662.155	319.510.867	332.899.391	346.847.006	361.380.406	376.521.836
INGRESOS POR MREC	US\$/AÑO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
INGRESOS TOTALES	US\$/AÑO		249.763.894	271.132.441	282.493.704	294.329.527	306.662.155	319.510.867	332.899.391	346.847.006	361.380.406	376.521.836
COSTOS VARIABLES												
SERVICIOS	US\$/AÑO		88.672.894	96.259.358	100.292.625	104.494.886	108.873.221	113.435.009	118.187.936	123.140.011	128.299.577	133.675.330
INSUMOS	US\$/AÑO		45.555.324	49.270.133	51.245.074	53.302.765	55.446.673	57.680.411	60.007.743	62.432.590	64.959.038	67.591.344
AMBIENTAL	US\$/AÑO		27.462.960	29.812.570	31.061.717	32.363.203	33.719.221	35.132.056	36.604.089	38.137.801	39.735.775	41.400.703
COSTOS VARIABLES TOTAL	US\$/AÑO		161.691.178	175.342.061	182.599.416	190.160.853	198.039.116	206.247.477	214.799.769	223.710.401	232.994.389	242.667.377
COSTOS FIJOS												
ANÁLISIS QUÍMICOS-AMBIENTAL	US\$/AÑO		1.373.148	1.490.629	1.553.086	1.618.160	1.685.961	1.756.603	1.830.204	1.906.890	1.986.789	2.070.035
MANTENCIÓN (5% CAPEX)	US\$/AÑO		7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521
REMUNERACIONES	US\$/AÑO		8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000
COSTOS FIJOS TOTAL	US\$/AÑO		17.784.669	17.902.150	17.964.607	18.029.681	18.097.482	18.168.124	18.241.725	18.318.411	18.398.310	18.481.556
COSTO TÉCNICO												
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
COSTOS TOTAL	US\$/AÑO		185.824.772	199.593.136	206.912.948	214.539.460	222.485.523	230.764.526	239.390.419	248.377.738	257.741.624	267.497.858
MARGEN OPERACIONAL	US\$/AÑO		88.072.716	95.790.380	99.894.288	104.168.674	108.623.039	113.263.390	118.099.622	123.136.605	128.386.017	133.854.459
UTILIDADES (ingresos-costos)	US\$/AÑO		63.939.122	71.539.305	75.580.756	79.790.067	84.176.632	88.746.341	93.508.972	98.469.268	103.638.782	109.023.978
IMPUESTOS (27%)	US\$/AÑO		17.263.563	19.315.612	20.406.804	21.543.318	22.727.691	23.961.512	25.247.422	26.586.702	27.982.471	29.436.474
UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS	US\$/AÑO		46.675.559	52.223.693	55.173.952	58.246.749	61.448.941	64.784.829	68.261.549	71.882.566	75.656.311	79.587.504
WC	US\$/AÑO		39.554.869									
FCI	US\$/AÑO		158.219.476									
TCI	US\$/AÑO		-197.774.345									
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
FLUJO NETO	US\$/AÑO		-197.774.345	53.024.484	58.572.618	61.522.877	64.595.674	67.797.867	71.133.754	74.610.475	78.231.491	82.005.236
FLUJO ACUMULADO	US\$/AÑO		-197.774.345	-144.749.861	-86.177.243	-24.654.365	39.941.309	107.739.176	178.872.930	253.483.404	331.714.896	413.720.131

Figura 26: Flujo de caja caso 1.

11.4.2 Caso 2

La tarifa mínima de venta del MREC para un VAN=0 es de -3.313 USD/ton lo cual es económicamente inviable. Este resultado puede explicarse por los siguientes motivos:

- Ingresos suficientes por cobre: Los ingresos generados por el concentrado de cobre son suficientes para cubrir los costos operativos y asegurar el retorno de la inversión, lo que hace innecesarios los ingresos provenientes del carbonato de tierras raras. En este escenario,

el cobre financia toda la operación, mientras que las tierras raras representan únicamente utilidades adicionales. Esto indica que, bajo las condiciones actuales, las tierras raras no desempeñan un rol determinante en el equilibrio financiero del proyecto.

- Subestimación de los costos de inversión: Si la inversión inicial está mal calculada y debería ser mayor, el análisis financiero no es confiable, ya que se estaría trabajando sobre valores erróneos. Esto genera la impresión de que el cobre cubre todos los costos, dejando a las tierras raras como un ingreso extra innecesario.

INGRESO	UNIDADES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRODUCCIÓN	TPA		21.289.116	23.110.519	24.078.850	25.087.754	26.138.931	27.234.152	28.375.263	29.564.187	30.802.926	32.093.569
INGRESOS POR COBRE	US\$/AÑO		249.763.894	271.132.441	282.493.704	294.329.527	306.662.155	319.510.867	332.899.391	346.847.006	361.380.406	376.521.836
INGRESOS POR MREC	US\$/AÑO		-24.010.156	-26.064.289	-27.157.617	-28.297.329	-29.480.112	-30.715.904	-32.004.707	-33.343.206	-34.741.341	-36.199.112
INGRESOS TOTALES	US\$/AÑO		225.753.738	245.068.152	255.336.087	266.032.198	277.182.043	288.794.963	300.894.684	313.503.800	326.639.065	340.322.724
COSTOS VARIABLES												
SERVICIOS	US\$/AÑO		88.672.894	96.259.358	100.292.625	104.494.886	108.873.221	113.435.009	118.187.936	123.140.011	128.299.577	133.675.330
INSUMOS	US\$/AÑO		45.555.324	49.270.133	51.245.074	53.302.765	55.446.673	57.680.411	60.007.743	62.432.590	64.959.038	67.591.344
AMBIENTAL	US\$/AÑO		27.462.960	29.812.570	31.061.717	32.363.203	33.719.221	35.132.056	36.604.089	38.137.801	39.735.775	41.400.703
COSTOS VARIABLES TOTAL	US\$/AÑO		161.691.178	175.342.061	182.599.416	190.160.853	198.039.116	206.247.477	214.799.769	223.710.401	232.994.389	242.667.377
COSTOS FIJOS												
ANALISIS QUIMICOS-AMBIENTAL	US\$/AÑO		1.373.148	1.490.629	1.553.086	1.618.160	1.685.961	1.756.603	1.830.204	1.906.890	1.986.789	2.070.035
MANTENCIÓN (5% CAPEX)	US\$/AÑO		7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521
REMUNERACIONES	US\$/AÑO		8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000
COSTOS FIJOS TOTAL	US\$/AÑO		17.784.669	17.902.150	17.964.607	18.029.681	18.097.482	18.168.124	18.241.725	18.318.411	18.398.310	18.481.556
COSTO TÉCNICO												
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
COSTOS TOTAL	US\$/AÑO		185.824.772	199.593.136	206.912.948	214.539.460	222.485.523	230.764.526	239.390.419	248.377.738	257.741.624	267.497.858
MARGEN OPERACIONAL	US\$/AÑO		64.062.560	69.726.092	72.736.671	75.871.344	79.142.928	82.547.486	86.094.916	89.793.399	93.644.675	97.655.347
UTILIDADES (Ingresos-costos)	US\$/AÑO		39.928.966	45.475.017	48.423.139	51.492.738	54.696.520	58.030.437	61.504.265	65.126.063	68.897.440	72.824.865
IMPUESTOS (27%)	US\$/AÑO		10.780.821	12.278.255	13.074.248	13.903.039	14.768.060	15.668.218	16.606.152	17.584.037	18.602.309	19.662.714
UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS	US\$/AÑO		29.148.145	33.196.762	35.348.892	37.589.699	39.928.460	42.362.219	44.898.113	47.542.026	50.295.131	53.162.152
WC	US\$/AÑO		-46.959.506									
FCI	US\$/AÑO		-187.838.026									
TCI	US\$/AÑO		-234.797.532									
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
FLUJO NETO	US\$/AÑO		-234.797.532	35.497.070	39.545.687	41.697.817	43.938.624	46.277.385	48.711.144	51.247.039	53.890.951	56.644.057
FLUJO ACUMULADO	US\$/AÑO		-234.797.532	-199.300.462	-159.754.775	-118.056.958	-74.118.334	-27.840.949	20.870.195	72.117.234	126.008.185	182.652.241

Figura 27: Flujo de caja caso 2.

11.4.3 Caso 3

La tarifa de carbonato mixto de tierras raras para un periodo de pago al tercer año es de 3.624 USD/ton. Además, los indicadores económicos determinan que, en este caso, bajo los supuestos de la sección 11.2, es viable.

Tabla 38: Indicadores económicos caso 3.

VAN USD	229.952.908
TIR	34%

INGRESO	UNIDADES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRODUCCIÓN	TPA		21.289.116	23.110.519	24.078.850	25.087.754	26.138.931	27.234.152	28.375.263	29.564.187	30.802.926	32.093.569
INGRESOS POR COBRE	US\$/AÑO		249.763.894	271.132.441	282.493.704	294.329.527	306.662.155	319.510.867	332.899.391	346.847.006	361.380.406	376.521.836
INGRESOS POR MREC	US\$/AÑO		26.266.465	28.513.630	29.709.702	30.956.517	32.250.449	33.602.373	35.012.288	36.476.570	38.006.092	39.600.855
INGRESOS TOTALES	US\$/AÑO		276.030.359	299.646.071	312.203.406	325.286.044	338.912.604	353.113.240	367.911.679	383.323.576	399.386.498	416.122.691
COSTOS VARIABLES												
SERVICIOS	US\$/AÑO		88.672.894	96.259.358	100.292.625	104.494.886	108.873.221	113.435.009	118.187.936	123.140.011	128.299.577	133.675.330
INSUMOS	US\$/AÑO		45.555.324	49.270.133	51.245.074	53.302.765	55.446.673	57.680.411	60.007.743	62.432.590	64.959.038	67.591.344
AMBIENTAL	US\$/AÑO		27.462.960	29.812.570	31.061.717	32.363.203	33.719.221	35.132.056	36.604.089	38.137.801	39.735.775	41.400.703
COSTOS VARIABLES TOTAL	US\$/AÑO		161.691.178	175.342.061	182.599.416	190.160.853	198.039.116	206.247.477	214.799.769	223.710.401	232.994.389	242.667.377
COSTOS FIJOS												
ANALISIS QUIMICOS-AMBIENTAL	US\$/AÑO		1.373.148	1.490.629	1.553.086	1.618.160	1.685.961	1.756.603	1.830.204	1.906.890	1.986.789	2.070.035
MANTENCIÓN (5% CAPEX)	US\$/AÑO		7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521
REMUNERACIONES	US\$/AÑO		8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000
COSTOS FIJOS TOTAL	US\$/AÑO		17.784.669	17.902.150	17.964.607	18.029.681	18.097.482	18.168.124	18.241.725	18.318.411	18.398.310	18.481.556
COSTO TÉCNICO												
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
COSTOS TOTAL	US\$/AÑO		185.824.772	199.593.136	206.912.948	214.539.460	222.485.523	230.764.526	239.390.419	248.377.738	257.741.624	267.497.858
MARGEN OPERACIONAL	US\$/AÑO		114.339.181	124.304.011	129.603.991	135.125.190	140.873.489	146.865.763	153.111.910	159.613.175	166.392.109	173.455.314
UTILIDADES (Ingresos-costos)	US\$/AÑO		90.205.587	100.052.936	105.290.459	110.746.584	116.427.081	122.348.714	128.521.260	134.945.838	141.644.874	148.624.833
IMPUESTOS (27%)	US\$/AÑO		24.355.508	27.014.293	28.428.424	29.901.578	31.435.312	33.034.153	34.700.740	36.435.376	38.244.116	40.128.705
UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS	US\$/AÑO		65.850.078	73.038.643	76.862.035	80.845.006	84.991.769	89.314.561	93.820.520	98.510.462	103.400.758	108.496.128
WC	US\$/AÑO		-46.959.506									
FCI	US\$/AÑO		-187.838.026									
TCI	US\$/AÑO		-234.797.532									
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
FLUJO NETO	US\$/AÑO		-234.797.532	72.199.004	79.387.568	83.210.960	87.193.932	91.340.695	95.663.486	100.169.445	104.859.387	109.749.683
FLUJO ACUMULADO	US\$/AÑO		-234.797.532	-162.598.529	-83.210.960	0	87.193.932	178.534.626	274.198.113	374.367.557	479.226.945	588.976.628

Figura 28: Flujo de caja caso 3.

Los beneficios económicos de este caso para el cliente son:

- Ingresos por concentrado de cobre: El cliente obtiene 263 USD/ton por tonelada de concentrado de cobre al año, lo que genera ingresos equivalentes a los del Caso 1.
- Ingresos por carbonato mixto de tierras raras: dado que el precio de mercado de este producto es de 4.821 USD/ton y se venden al cliente a 3.624 USD/ton, se generan ingresos de 1.197 USD/ton, resultando en más de 8 MMUSD el primer periodo hasta más de 13 MMUSD el último periodo.

11.4.4 Caso 4

En el caso de que Anglo American procesara sus propios relaves, los precios de venta de los productos serían los del mercado. El precio para el concentrado de cobre al 20% se estima en 1.746 USD/ton, lo cual se calcula tomando el precio de mercado del cobre fino (aproximadamente 8.730 USD/ton) y considerando que solo el 20% de ese precio corresponde al contenido de cobre del concentrado. En cuanto al carbonato mixto de tierras raras su precio estimado es de 4.821 USD/ton, en este caso el precio ya está calculado considerando lo que se puede recuperar de tierras raras y los descuentos por procesamiento.

De acuerdo, con los indicadores económicos presentados en la Tabla 39, el servicio de procesamiento es factible económicamente. Y en la Figura 29 el periodo de pago de la inversión es al tercer año, Figura 29.

Tabla 39: Indicadores económicos caso 4.

		VAN USD		472.195.528								
		TIR		52%								
INGRESO	UNIDADES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRODUCCIÓN	TPA		21.289.116	23.110.519	24.078.850	25.087.754	26.138.931	27.234.152	28.375.263	29.564.187	30.802.926	32.093.569
INGRESOS POR COBRE	US\$/AÑO		294.057.828	319.215.942	332.592.048	346.526.874	361.046.610	376.173.954	391.936.842	408.357.972	425.468.772	443.295.432
INGRESOS POR MREC	US\$/AÑO		34.937.787	37.926.807	39.517.737	41.176.161	42.897.258	44.695.491	46.570.860	48.518.544	50.553.006	52.674.246
INGRESOS TOTALES	US\$/AÑO		328.995.615	357.142.749	372.109.785	387.703.035	403.943.868	420.869.445	438.507.702	456.876.516	476.021.778	495.969.678
COSTOS VARIABLES												
SERVICIOS	US\$/AÑO		88.672.894	96.259.358	100.292.625	104.494.886	108.873.221	113.435.009	118.187.936	123.140.011	128.299.577	133.675.330
INSUMOS	US\$/AÑO		45.555.324	49.270.133	51.245.074	53.302.765	55.446.673	57.680.411	60.007.743	62.432.590	64.959.038	67.591.344
AMBIENTAL	US\$/AÑO		27.462.960	29.812.570	31.061.717	32.363.203	33.719.221	35.132.056	36.604.089	38.137.801	39.735.775	41.400.703
COSTOS VARIABLES TOTAL	US\$/AÑO		161.691.178	175.342.061	182.599.416	190.160.853	198.039.116	206.247.477	214.799.769	223.710.401	232.994.389	242.667.377
COSTOS FIJOS												
ANÁLISIS QUÍMICOS-AMBIENTAL	US\$/AÑO		1.373.148	1.490.629	1.553.086	1.618.160	1.685.961	1.756.603	1.830.204	1.906.890	1.986.789	2.070.035
MANTECIÓN (5% CAPEX)	US\$/AÑO		7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521
REMUNERACIONES	US\$/AÑO		8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000
COSTOS FIJOS TOTAL	US\$/AÑO		17.784.669	17.902.150	17.964.607	18.029.681	18.097.482	18.168.124	18.241.725	18.318.411	18.398.310	18.481.556
COSTO TÉCNICO												
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
COSTOS TOTAL	US\$/AÑO		185.824.772	199.593.136	206.912.948	214.539.460	222.485.523	230.764.526	239.390.419	248.377.738	257.741.624	267.497.858
MARGEN OPERACIONAL	US\$/AÑO		167.304.437	181.800.688	189.510.369	197.542.182	205.904.752	214.621.968	223.707.933	233.166.115	243.027.389	253.302.301
UTILIDADES (Ingresos-costos)	US\$/AÑO		143.170.843	157.549.613	165.196.837	173.163.575	181.458.345	190.104.919	199.117.283	208.498.778	218.280.154	228.471.820
IMPUESTOS (27%)	US\$/AÑO		38.656.128	42.538.396	44.603.146	46.754.165	48.993.753	51.328.328	53.761.666	56.294.670	58.935.641	61.687.391
UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS	US\$/AÑO		104.514.715	115.011.218	120.593.691	126.409.410	132.464.592	138.776.591	145.355.616	152.204.108	159.344.512	166.784.428
WC	US\$/AÑO		-46.959.506									
FCI	US\$/AÑO		-187.838.026									
TCI	US\$/AÑO		-234.797.532									
DEPRECIACION	US\$/AÑO			6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
FLUJO NETO	US\$/AÑO		-234.797.532	110.863.641	121.360.143	126.942.617	132.758.335	138.813.517	145.125.516	151.704.542	158.553.034	165.693.437
FLUJO ACUMULADO	US\$/AÑO		-234.797.532	-123.933.892	-2.573.749	124.368.868	257.127.203	395.940.720	541.066.236	692.770.778	851.323.812	1.017.017.249

Figura 29: Flujo de caja caso 4.

11.4.5 Caso 5

La tarifa de carbonato mixto de tierras raras se estima en 4.095 USD/ton, el cálculo detallado se encuentra en el

Anexo C.Y la tarifa de concentrado de cobre es 1.483 USD/ton. En este caso de acuerdo con la Tabla 40, el servicio de procesamiento es rentable. Y el periodo de pago de la inversión es en el tercer periodo.

Tabla 40: Indicadores económicos caso 5.

VAN USD	245.543.203
TIR	35%

INGRESO	UNIDADES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PRODUCCION	TPA		21.289.116	23.110.519	24.078.850	25.087.754	26.138.931	27.234.152	28.375.263	29.564.187	30.802.926	32.093.569
INGRESOS POR COBRE	US\$/AÑO		249.763.894	271.132.441	282.493.704	294.329.527	306.662.155	319.510.867	332.899.391	346.847.006	361.380.406	376.521.836
INGRESOS POR MREC	US\$/AÑO		29.675.108	32.213.892	33.565.180	34.973.795	36.435.644	37.963.009	39.555.891	41.210.195	42.938.206	44.739.924
INGRESOS TOTALES	US\$/AÑO		279.439.002	303.346.333	316.058.884	329.303.322	343.097.799	357.473.876	372.455.282	388.057.201	404.318.612	421.261.760
COSTOS VARIABLES												
SERVICIOS	US\$/AÑO		88.672.894	96.259.358	100.292.625	104.494.886	108.873.221	113.435.009	118.187.936	123.140.011	128.299.577	133.675.330
INSUMOS	US\$/AÑO		45.555.324	49.270.133	51.245.074	53.302.765	55.446.673	57.680.411	60.007.743	62.432.590	64.959.038	67.591.344
AMBIENTAL	US\$/AÑO		27.462.960	29.812.570	31.061.717	32.363.203	33.719.221	35.132.056	36.604.089	38.137.801	39.735.775	41.400.703
COSTOS VARIABLES TOTAL	US\$/AÑO		161.691.178	175.342.061	182.599.416	190.160.853	198.039.116	206.247.477	214.799.769	223.710.401	232.994.389	242.667.377
COSTOS FIJOS												
ANALISIS QUIMICOS-AMBIENTAL	US\$/AÑO		1.373.148	1.490.629	1.553.086	1.618.160	1.685.961	1.756.603	1.830.204	1.906.890	1.986.789	2.070.035
MANTENCION (5% CAPEX)	US\$/AÑO		7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521	7.513.521
REMUNERACIONES	US\$/AÑO		8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000	8.898.000
COSTOS FIJOS TOTAL	US\$/AÑO		17.784.669	17.902.150	17.964.607	18.029.681	18.097.482	18.168.124	18.241.725	18.318.411	18.398.310	18.481.556
COSTO TÉCNICO												
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
COSTOS TOTAL	US\$/AÑO		185.824.772	199.593.136	206.912.948	214.539.460	222.485.523	230.764.526	239.390.419	248.377.738	257.741.624	267.497.858
MARGEN OPERACIONAL	US\$/AÑO		117.747.824	128.004.272	133.459.468	139.142.469	145.058.683	151.226.399	157.655.513	164.346.800	171.324.223	178.594.383
UTILIDADES (Ingresos-costos)	US\$/AÑO		93.614.230	103.753.197	109.145.936	114.763.863	120.612.276	126.709.350	133.064.863	139.679.464	146.576.988	153.763.902
IMPUESTOS (27%)	US\$/AÑO		25.275.842	28.013.363	29.469.403	30.986.243	32.565.314	34.211.524	35.927.513	37.713.455	39.575.787	41.516.253
UTILIDADES DESPUES IMPUESTOS	US\$/AÑO		68.338.388	75.739.834	79.676.533	83.777.620	88.046.961	92.497.825	97.137.350	101.966.008	107.001.201	112.247.648
WC	US\$/AÑO		-46.959.506									
FCI	US\$/AÑO		-187.838.026									
TCI	US\$/AÑO		-234.797.532									
DEPRECIACION	US\$/AÑO		6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925	6.348.925
FLUJO NETO	US\$/AÑO		-234.797.532	74.687.313	82.088.759	86.025.459	90.126.545	94.395.886	98.846.751	103.486.275	108.314.934	113.350.126
FLUJO ACUMULADO	US\$/AÑO		-234.797.532	-160.110.219	-78.021.460	8.003.998	98.130.543	192.526.430	291.373.180	394.859.455	503.174.389	616.524.515

Figura 30: Flujo de caja caso 5.

Comparando el caso 1 con el 5, incorporar los ingresos por carbonato mixto de tierras raras, considerando su inversión respectiva, el VAN aumenta en 98.703.462 USD, por ende, mejora la rentabilidad del servicio de procesamiento de relaves.

Los beneficios económicos de este caso para el cliente son:

- Ingresos por concentrado de cobre: 263 USD/ton de concentrado de cobre.
- Ingresos por carbonato mixto de tierras raras: 726 USD/ton de carbonato mixto de tierras raras.

Estos beneficios para el cliente equivalen a 49 MMUSD en el primer periodo, hasta 74 MMUSD en el último periodo de evaluación. Ver Tabla 41: Beneficios económicos clientes caso 5.

Tabla 41: Beneficios económicos clientes caso 5.

Periodo	Ingresos por concentrado de cobre USD	Ingresos por MREC USD	Total USD
1	44.293.934	5.262.679	49.556.613
2	48.083.501	5.712.915	53.796.416
3	50.098.344	5.952.557	56.050.901
4	52.197.347	6.202.366	58.399.713
5	54.384.455	6.461.614	60.846.069
6	56.663.087	6.732.482	63.395.569
7	59.037.451	7.014.969	66.052.420
8	61.510.966	7.308.349	68.819.315
9	64.088.366	7.614.800	71.703.166

10	66.773.596	7.934.322	74.707.918
----	------------	-----------	------------

11.5 Análisis de sensibilidad

11.5.1 Ley de Cobre

El primer supuesto a variar será la ley de cobre, que en los relaves actuales tiene una concentración aproximada de 0,1%. En los relaves más antiguos, esta ley puede variar entre 0,2% y 0,6%. El objetivo es evaluar cómo la concentración mínima de cobre en el relave afecta los indicadores económicos del proyecto. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 42: Sensibilidad de la Ley de Cobre en el VAN en USD.

Δ Ley de cobre	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
0,1	-412.653.378	-285.106.216	-107.686.349	-263.749.649
0,6	2.903.216.564	2.986.329.732	3.717.397.102	3.001.920.026

Se obtiene que la Ley de Cobre es una variable crítica, ya que su mínima concentración provoca VAN negativo, lo que se traduce en que en esas condiciones el proceso no sería rentable. Mientras que para una ley de cobre 0,6, el VAN es hasta 10 veces más grandes que en el caso del supuesto donde la ley es de 0,18.%

En la figura a continuación se puede interpolar que las leyes mínimas de cobre para los casos 1, 3, 4 y 5 tienen que ser de 0,16, 0,15, 0,1, 0,14, respectivamente.

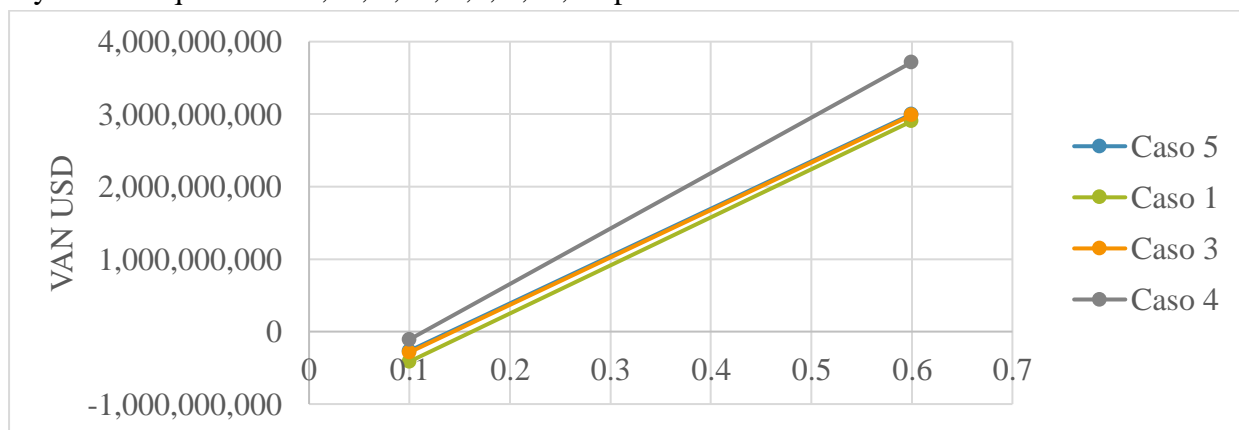


Figura 31: Sensibilidad de la Ley de Cobre en el VAN.

11.5.2 CAPEX

Dado que este proyecto corresponde a un estudio de perfil, el CAPEX se clasifica de clase 5, con un margen de error de $\pm 40\%$. En este análisis, la inversión total se calculó mediante el TCI, donde se considerará equivalente al CAPEX.

Se evaluó el impacto de un aumento de la inversión en un rango del 10% al 40% para determinar su efecto en el VAN. Los resultados, presentados en la Tabla 43, muestran que, en todos los casos, el VAN permanece positivo. Esto indica que la inversión no es una variable crítica para la rentabilidad del proyecto y que no es necesario reducirla, ya que el VAN continuará siendo positivo incluso con incrementos en la inversión.

Sin embargo, en el Caso 3, donde el criterio es que el periodo de pago sea en el tercer año, este requisito no se cumple para los aumentos de un 30 y 40%, lo que puede presentar desafíos para el inversionista.

Tabla 43: Sensibilidad de la inversión en el VAN en USD.

ΔVAN	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
0%	146.839.741	229.952.908	472.195.528	245.543.203
10%	127.062.306	206.473.155	448.715.774	222.063.449
20%	107.284.872	182.993.402	425.236.021	198.583.696
30%	87.507.437	159.513.649	401.756.268	175.103.943
40%	67.730.002	136.033.895	378.276.515	151.624.190

11.5.3 Eficiencia de recuperación de cobre

Estudios de recuperación de cobre desde relaves mineros indican una eficiencia de recuperación superiores al 70% (Valderrama & Enrique, 2019). Por ende, se va a evaluar el impacto en la disminución de la eficiencia de recuperación en el VAN. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 44: Sensibilidad de recuperación de cobre en el VAN USD.

$\Delta \eta_{cobre}$	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
70%	-107.007.917	-23.894.750	173.329.708	-8.304.455
90%	146.839.741	229.952.908	472.195.528	245.543.203

La eficiencia de recuperación de cobre es una variable crítica, ya que al disminuir el VAN se hace negativo, excepto para el caso 4, que es donde el cliente procesa sus propios relaves. Las eficiencias aproximadas para que el VAN sea igual a cero, deben ser 79%, 72%, 50% y 71%, respectivamente. A partir de estos valores se observa que a medida que el VAN es más negativo, la eficiencia de recuperación de cobre debe ser mayor para alcanzar un VAN igual a cero. Esto indica una alta sensibilidad del proyecto frente a la eficiencia de recuperación.

Por otro lado, en el caso 4, donde el cliente procesa sus propios relaves, el VAN se mantiene positivo y para alcanzar un VAN igual a cero la eficiencia tiene que ser mucho menor, sugiriendo un control directo sobre el proceso de recuperación, permitiendo un ajuste más flexible de la operación.

11.5.4 Eficiencia de recuperación de tierras raras

Diversos estudios han obtenido eficiencias de recuperación de hasta el 93% y mínimas del 30%, dependiendo del colector utilizado (Blankson, Zanin, Addai-Mensah, & Skinner). Por lo tanto se va a analizar la disminución en la eficiencia de recuperación de tierras raras en el VAN. Los resultados se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 45: Sensibilidad de la eficiencia de recuperación de tierras raras en el VAN.

$\Delta \eta_{RE}$	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
30%	N/A	154.867.687	372.322.496	160.714.047
80%	N/A	229.952.908	472.195.528	245.543.203

De los resultados obtenidos, no se observan impactos significativos en el VAN para ninguno de los casos, lo que indica una baja sensibilidad de esta variable respecto al VAN. Esto puede deberse a que más del 90% de la producción proviene del concentrado de cobre, lo que se traduce en ingresos significativamente más altos en comparación con los generados por el carbonato de tierras raras.

11.5.5 Remoción de relave

El costo por remoción de relave utilizando camión y pala es de 3 USD/ton. Este costo variable representa el 72,03% de los servicios, teniendo una participación significativa. Es por ello que se considera un caso en el que los costos se elevan a 5 USD/ton y se evalúa su impacto en el VAN. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 46: Sensibilidad del costo de remoción en el VAN.

Remoción por camión y pala	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
3 USD/ton	146.839.741	229.952.908	472.195.528	245.543.203
5 USD/ton	-47.895.363	35.217.804	277.460.424	50.808.099

Se observa que, bajo los supuestos planteados, solo en el caso 1 el proyecto no es rentable, ya que el VAN resulta negativo. En cambio, en los casos 3, 4 y 5, el VAN permanece positivo, lo que indica que esta variable no es crítica para dichos escenarios. Sin embargo, en el caso 1, la variable debe ser controlada cuidadosamente para garantizar la rentabilidad del proyecto.

11.5.6 Precio energía eléctrica

La energía eléctrica representa el 38,7% de los costos por servicio, con un costo base de 0,107 kWh/ton. Por lo tanto, se evaluó el impacto de un aumento en el precio de la energía eléctrica sobre el VAN. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 47: Sensibilidad del precio de la energía eléctrica en el VAN.

Precio energía eléctrica	Caso 1	Caso 3	Caso 4	Caso 5
0,107 kWh/ton	146.839.741	229.952.908	472.195.528	245.543.203
0,214 kWh/ton	33.800.881	116.914.049	359.156.668	132.504.343

Se observa que, para todos los casos, el VAN permanece positivo y no presenta disminuciones significativas. Por lo tanto, el precio de la energía eléctrica no constituye una variable crítica en el análisis económico del proyecto.

12 Conclusiones

El mercado de las tierras raras está marcado por una fuerte dependencia de China, que controla la mayor parte de la producción global y posee las mayores reservas de estos elementos. Esta situación genera incertidumbre sobre el suministro, tal como ocurrió en 2010, cuando China impuso restricciones a las exportaciones, afectando negativamente la oferta mundial. Además, se espera que la demanda de tierras raras aumente considerablemente debido a su papel crucial en tecnologías sostenibles, lo que podría generar escasez de proveedores. Esta situación representa una oportunidad estratégica para diversificar las fuentes de suministro y atender la demanda no cubierta.

El análisis técnico reveló que no existe una tecnología única para el procesamiento de tierras raras, ya que cada proceso depende de la mineralogía del relave y el tamaño de partícula. En el diseño de la etapa de hidrometalurgia, es crucial seleccionar reactivos de bajo impacto ambiental para garantizar la viabilidad ambiental del proyecto. Adicionalmente, la selección de tecnologías debe priorizar la eficiencia de extracción de elementos valiosos como tierras raras y cobre, maximizando la recuperación y minimizando los costos.

El Tranque 4 de la mina El Soldado fue identificado como depósito óptimo, considerando las concentraciones de las especies de interés, masa del depósito e infraestructura existente. Este depósito, gestionado por Anglo American, presenta ventajas estratégicas como su proximidad a cuatro depósitos adicionales en la misma mina, lo que amplía la capacidad de procesamiento. No obstante, las posibles soluciones para asegurar la sostenibilidad del proyecto deben ser estudiadas con mayor detalle para determinar la inversión necesaria y garantizar su viabilidad social, técnica y económica.

El diseño del proceso, adaptado a las condiciones del Tranque 4 y extrapolable a los otros depósitos, incluye cuatro etapas principales: remoción, molienda, beneficio e hidrometalurgia. Las operaciones unitarias fueron seleccionadas en función de criterios técnicos, ambientales y supuestos sobre la mineralogía de las especies de interés. Por lo tanto, este diseño depende fuertemente de la mineralogía y se recomienda estudiar esta con mayor detalle. En la etapa de hidrometalurgia se priorizó el uso de reactivos de bajo impacto y la producción nacional de ácido sulfúrico, un subproducto de la minería, para reducir los costos operativos.

La evaluación económica indica que tanto el servicio de maquila como el procesamiento propio de los relaves resultan económicamente atractivos. Sin embargo, el modelo de maquila presenta un menor riesgo, tanto en términos de inversión como en la estabilidad de los precios de los productos. Además, la incorporación de tierras raras incrementa significativamente la rentabilidad del servicio, generando mayores beneficios económicos. Por otro lado, el análisis de sensibilidad revela que la rentabilidad depende en gran medida de la recuperación de cobre y de los costos asociados a la remoción de los relaves. Por lo tanto, para minimizar estos riesgos, se recomienda realizar un estudio exhaustivo sobre la concentración de cobre en los relaves y desarrollar un plan de producción estratégico que optimice su recuperación.

Finalmente, el procesamiento de relaves mineros en Chile para la producción de carbonato mixto de tierras raras representa una solución sostenible que responde a la creciente demanda global y a

la necesidad de gestionar pasivos ambientales y es técnico y económicamente atractivo. Este enfoque no solo genera valor económico al diversificar las fuentes de suministro globales y fortalecer la competitividad del sector minero chileno, sino que también posiciona a Chile como un actor clave en la transición hacia prácticas más sostenibles. Además, bajo el modelo de maquila, se reducen los riesgos financieros, ya que las tarifas son establecidas mediante acuerdos entre el cliente y la maquiladora.

13 Referencias

- Abaka-Wood, G., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2016). *Froth flotation of monazite from mixed minerals*. ResearchGate.
- Abaka-Wood, G., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2021). *El uso de relaves mineros como análogos de recursos de tierras raras: Parte 1 – Caracterización y separación preliminar*. Taylor & Francis.
- Aclara. (2023). *Capítulo 1 Descripción de Proyecto EIA “Proyecto Módulo Penco”*.
- Aclara. (10 de Junio de 2024). *Aclara ingresa a evaluación ambiental proyecto optimizado de tierras raras en Penco*. Obtenido de Aclara: <https://somoaclara.cl/aclara-ingresa-a-evaluacion-ambiental-proyecto-optimizado-de-tierras-raras-en-penco/>
- Aguas Pacífico. (2024). *Planta Desalinizadora Aguas Pacífico*. Obtenido de Aguas Pacífico: <https://www.aguaspacifico.cl/planta-desalinizadora#:~:text=La%20nueva%20planta%2C%20ubicada%20en,Quilapilún%2C%20en%20la%20región%20Metropolitana.>
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). *Drenaje ácido de minas (AMD): causas, tratamiento y estudios de casos*. ELSEVIER.
- Anglo American. (2024). *El Soldado*. Obtenido de Anglo American: <https://chile.angloamerican.com/acerca-de-nosotros/nuestras-operaciones-en-chile/el-soldado.aspx>
- Araya, N., & et al. (2019). *Hacia la valorización de relaves mineros: Recuperación de materiales críticos de relaves mineros chilenos*. ELSEVIER.
- Arafura. (2022). *Oferta y demanda*. Obtenido de Arafura: <https://www.arultd.com/products/supply-and-demand/#:~:text=Global%20consumption%20of%20rare%20earths,to%20231%2C000%20tonnes%20by%202032.>
- ARAFURA Rare Earth Limited. (2022). *Supply and demand*. Obtenido de ARAFURA Rare Earth Limited: <https://www.arultd.com/products/supply-and-demand/>
- Balaram, V. (2023). *Posibles recursos alternativos futuros para tierras raras: oportunidades y desafíos*. MDPI.
- Balaram, V. (2019). *Elementos de tierras raras: una revisión de aplicaciones, ocurrencia, exploración, análisis, reciclaje e impacto ambiental*. ELSEVIER.
- Blankson, G., Zanin, M., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (s.f.). *Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings – Part 2: Froth flotation separation*. ELSEVIER. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687519302997>
- BCN. (2023). *Impactos socioeconómicos de la minería en Chile*. Obtenido de BCN: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf
- BCN. (2011). *Ley 20551*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1032158>
- BCN. (2022). *Ley 21.435*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1174443>
- BCN. (1981). *DFL 1.122*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605&idVersion=2024-05-30&idParte=10481694>

- BCN. (2015). *Decreto 50*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1085618>
- BCN. (2024). *LEY 18097 LEY ORGANICA CONSTITUCIONAL SOBRE CONCESIONES MINERAS*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29522>
- BCN. (2020). *DECRETO 41 APRUEBA REGLAMENTO DE LA LEY DE CIERRE DE FAENAS E INSTALACIONES MINERAS*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1045967>
- BCN. (2020). *Relaves Mineros*. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29390/1/Relaves_Mineros_Legislacion_comparada.pdf
- BCG. (2023). *Five Steps for Solving the Rare-Earth Metals Shortage*. Obtenido de BCG: <https://www.bcg.com/publications/2023/five-steps-for-solving-the-rare-earth-metals-shortage>
- BCN. (1983). *Ley 18248 Código de Minería*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29668>
- BCN. (2004). *Decreto 132 Reglamento de Seguridad Minera*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064>
- BCN. (2004). *Decreto 148 Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos*. Obtenido de BCN: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2022). *Pasado, presente y futuro de la gobernanza de relaves mineros de cobre en Chile (1905-2022): una revisión en uno de los principales países mineros del mundo*. MDPI.
- Campos Ordaz, B. (2015). *MODELO DE NEGOCIO PARA EL TRATAMIENTO DE RELAVES EN LA MINERIA CHILENA*. Universidad de Chile.
- Castro Bravo, R. (2022). *Comparación de procesos de concentración gravimétrica entre mesa vibratoria y espiral para la obtención de un concentrado de óxido de hierro (FeO)*. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.
- Centro de Ciencias Costeras y Marinas del Pacífico. (2024). *Usos potenciales de los elementos de tierras raras que se encuentran en los minerales marinos*. Obtenido de USGS: [https://www.usgs.gov/media/images/potential-uses-rare-earth-elements-found-marine-minerals#:~:text=Rare%20earth%20elements%20\(REEs\)%20and,about%20300%20kilograms%20of%20neodymium](https://www.usgs.gov/media/images/potential-uses-rare-earth-elements-found-marine-minerals#:~:text=Rare%20earth%20elements%20(REEs)%20and,about%20300%20kilograms%20of%20neodymium).
- Cen, P., Bian, X., Liu, Z., Gu, M., Wu, W., & Li, B. (2021). *Extracción de tierras raras a partir de concentrados de bastnasita: una revisión crítica y una perspectiva de futuro*. ELSEVIER.
- Cheng, S., Li, W., Han, Y., Sun, Y., & Gao, P. (2024). *Avances recientes en el proceso de beneficio y metalurgia de tierras raras: una revisión*. ELSEVIER.
- Chile Agenda 2030. (2024). *Política Nacional Minera 2050*. Obtenido de Chile Agenda 2030: <https://www.chileagenda2030.gob.cl/institucionalidad/iniciativaficha/35>
- Cifuentes, C. (2019). *Chile, minería más allá del cobre*. Obtenido de COCHILCO: https://www.cochilco.cl/Presentaciones/2019%2008%2022%20Chile%20-%20minería%20más%20allá%20del%20cobre_CCG.pdf
- Comisión Europea. (2023). *Estudio sobre las materias primas críticas para la UE*.
- Consejo Minero. (2023). *Cifras actualizadas de la minería*.
- Consejo Europeo. (2024). *Una ley de materias primas de la UE fundamental para el futuro de las cadenas de suministro de la UE*. Obtenido de Consejo Europeo: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/>

- Cox, B., Innis, S., Mortaza, A., Kunz, N., & Steen, J. (2024). *A unified metric for costing tailings dams and the consequences for tailings management*. ELSEVIER.
- CODELCO. (2019). *Lixiviación "El riego"*.
- COCHILCO. (2016). *Situación actual del mercado de tierras Registro Propiedad Intelectual © N°270142 raras y su potencial en Chile*.
- COCHILCO. (2024). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2023 – 2034*. Santiago.
- CORFO. (2013). *"Identificar elementos de valor en residuos mineros (relaves) y evaluar su recuperación como productos comerciales"*. Obtenido de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe_Tecnico_Final_13BPC3-19021.pdf
- Demol, J., Ho, E., & Senanayake, G. (2018). *Horneado con ácido sulfúrico y lixiviación de tierras raras, torio y fosfato T a partir de un concentrado de monacita: efecto de la temperatura de horneado de 200 a 800 °C*. ELSEVIER.
- Departamento de Industria, Ciencia, Energía y Recursos. (2021). *Perspectivas para minerales críticos seleccionados*.
- Domic Mihovilovic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones*.
- Dushyantha, N. e. (2020). *La historia de los elementos de tierras raras: ocurrencias, distribución global, génesis, geología, mineralogía y producción global*. ELSEVIER.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Dissanayake, K. (2020). *La historia de los elementos de tierras raras (REE): aparición, distribución global, génesis, geología, mineralogía y producción global*. ELSEVIER.
- European Commission. (2023). *Estudio de Materias Primas Críticas para la UE, Reporte Final 2023*.
- ENAMI. (2024). *Tarifas mes de abril 2024*.
- Fleming, P., Orrego, P., & Pinilla, F. (2021). *Recuperación de elementos de tierras raras presentes en colas mineras, por lixiviación con soluciones nítricas e hidroclicóricas*. Obtenido de Scientific Research: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=106428#f14>
- Geoscience Australia. (2024). *Minerales críticos en Geoscience Australia*. Obtenido de Gobierno de Australia/ Geoscience Australia: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/critical-minerals>
- Gomes Silva, R., Antonio Morais, C., Viana Teixeira, L., & Domingos Oliveira, É. (2019). *Selective Precipitation of High-Quality Rare Earth Oxalates or Carbonates from a Purified Sulfuric Liquor Containing Soluble Impurities*. Mining, Metallurgy & Exploration.
- Gupta, C., & Krishnamurthy, N. (2005). *Metalurgia Extractiva de Tierras Raras*. CRC PRESS.
- Hacienda, M. d. (2023). *Royalty a la gran minería del cobre*.
- Hatch, G. (2012). *Dinámica del mercado mundial de tierras raras*.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., & Vernon, C. (2014). *Elementos de tierras raras: descripción general de la minería, mineralogía, usos, sostenibilidad e impacto ambiental*. Resources.
- InvestChile. (2022). *Minería Proyección y Oportunidades*.
- IEA. (2024). *Perspectivas mundiales sobre minerales críticos para 2024*.
- ISE. (2024). *Elementos de tierras raras (REE)*. Obtenido de <https://en.institut-seltenerden.de/rare-earths-and-metals/rare-earth/>
- Julapong, P., Numprasanthai, A., Tangwattananukul, L., Juntarasakul, O., Srichonphaisarn, P., Aikawa, K., . . . Phengsaart, T. (2023). *Recuperación de elementos de tierras raras a partir de recursos primarios y secundarios mediante flotación: una revisión sistemática*. MDPI.
- Jordens, A., Rawson, N., Sheridan, R., & Waters, K. (2014). *Procesamiento de un depósito de minerales de tierras raras mediante separación magnética y por gravedad*. ELSEVIER.

- Jordens, A., Marion, C., Langlois, R., Grammatikopoulos, T., Rowson, N., & Waters, K. (2016). *Beneficiación del yacimiento de tierras raras de Nechalacho. Parte 1: Separación gravitacional y magnética*. ELSEVIER.
- JRI Ingeniería S.A., & EcoMetales Limited. (2020). *Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor*.
- Kim, E., & Osseo-Asare, K. (2012). *Estabilidad acuosa del torio y de los metales de tierras raras en la hidrometalurgia de la monacita: diagramas Eh-pH para los sistemas Th-, Ce-, La-, Nd- (PO₄)-(SO₄)-H₂O a 25 °C*. ELSEVIER.
- Kumar, S., & et al. (2021). *Recuperación de minerales críticos de importancia estratégica a partir de relaves mineros*. ELSEVIER.
- Kotthoff Cáceres, K. (2020). *MINERALOGÍA DE DEPÓSITOS DE RELAVE EN CHILE Y RELACIÓN CON YACIMIENTOS DE ORIGEN: POTENCIAL PARA LA RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS DE VALOR*. Universidad de Chile.
- Klemettinen, A., Adamski, Z., Chojnacka, I., Lesniewicz, A., & Rycerz, L. (2023). *Recuperación de elementos de tierras raras a partir de soluciones de lixiviación de imanes permanentes de NdFeB gastados mediante precipitación selectiva de oxalatos de tierras raras*. MDPI.
- Maltrana, V., & Morales, J. (2023). *El uso de la lixiviación ácida para recuperar metales de relaves: una revisión*. MDPI.
- Ministerio de Minería. (2007). *DECRETO SUPREMO N°248*. Obtenido de Sernageomin: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/07/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- Ministerio de Minería. (2007). *DECRETO SUPREMO No 248*.
- Mining. (2021). *Magnet rare earth oxides market to increase fivefold by 2030 — report*. Obtenido de Mining: <https://www.mining.com/magnet-rare-earth-oxides-market-to-increase-fivefold-by-2030-report/>
- Mining.com. (2024). *Western rare earths supply chain springs into gear*. Obtenido de Mining.com: <https://www.mining.com/web/western-rare-earths-supply-chain-springs-into-gear/>
- Mining Technology. (2014). *Proyecto de modernización de la mina de tierras raras de Mountain Pass, California*. Obtenido de Mining Technology: <https://www.mining-technology.com/projects/mountain-pass-rare-earth-mine-modernisation-project-california/?cf-view>
- McNulty, T., & et al. (2022). *Procesamiento de minerales de elementos de tierras raras*.
- Mordor Intelligence. (2024). *Tamaño del mercado de metales de tierras raras y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029) Source: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/rare-earth-elements-market*. Obtenido de Mordor Intelligence: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/rare-earth-elements-market>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *INSTRUCCIÓN TÉCNICA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LAS EXTRACCIONES MARINAS PARA LA OBTENCIÓN DE ARENA*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/costas/publicaciones/Instruccion%20Extracciones%20Arena%20rel2_tcm30-157025.pdf
- Marion, C., Li, R., & Waters, K. (2020). *Una revisión de los reactivos aplicados a la flotación de minerales de tierras raras*. ELSEVIER.
- Nawab, A., Yang, X., & Honaker, R. (2022). *Estudio paramétrico y análisis de especiación de la precipitación de tierras raras utilizando ácido oxálico en un sistema de solución de cloruro*. ELSEVIER.

- NJ Gov Health. (2006). *Hoja Informativa sobre substancias peligrosas: Fosfato Trisódico*. Obtenido de NJ Gov Health: <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1724sp.pdf>
- Oficina de Comunicaciones y Publicaciones (OCAP). (2022). *El Servicio Geológico de Estados Unidos publica la lista de minerales críticos para 2022*. Obtenido de USGS: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals>
- Pradip, & Fuerstenau, D. (1985). *Adsorción de colectores de hidroxamato sobre minerales semisolubles. Parte II: Efecto de la temperatura en la adsorción*. ELSEVIER.
- Peelman, S., Sun, Z., Sietsma, J., & Yang, Y. (2014). *Lixiviación de tierras raras: pasado y presente*.
- Peters, M., & Timmerhaus, K. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill.
- Persistence Market Research. (2024). Obtenido de <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/rare-earth-elements-market.asp>: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/rare-earth-elements-market.asp>
- Pavez, O., Valderrama, L., & Zazzali, B. (2018). *Concentración por flotación de minerales que contienen tierras raras: una revisión*. Revista de la Facultad de Ingeniería.
- Pavez, I. (2020). *“Proceso de Extracción de Elementos de Tierras Raras (lantánidos, neodimio y disprosio) de bajo impacto ambiental a partir de relaves geoquímicamente catastrados”*. Concepción.
- Resumen. (2019). *El gran desastre del tranque y relave El Cobre que dejó cientos de muertos en Chile*. Obtenido de Resumen: <https://resumen.cl/articulos/gran-desastre-tranque-relave-el-cobre-dejo-cientos-muertos-chile>
- Resources, M. (s.f.). *Mercado de las tierras raras*. Obtenido de Meteoric Resources: <https://meteoric.com.au/ree-market/#:~:text=Global%20demand%20for%20rare%20earth,market%20demand%20for%20Permanent%20Magnets>.
- Rainbow. (2024). *Rainbow Rare Earth Limited Annual Report 2024*. Obtenido de Rainbow : https://www.rainbowrareearths.com/wp-content/uploads/2024/10/RRE-2024-Annual-Report_Final-1.pdf
- Sadri, F., Nazari, A., & Ghahreman, A. (2017). *Una revisión sobre los procesos de craqueo, horneado y lixiviación de concentrados de elementos de tierras raras*. ELSEVIER.
- Sobri, N., Yunus, M., & Harun, N. (2023). *Una revisión de la arcilla de adsorción de iones como fuente de alto potencial de minerales de tierras raras en Malasia*. ELSEVIER.
- Sernageomin. (2023). *Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile (03/2023)*.
- Solvay. (2022). *Solvay and Hastings sign Memorandum of Understanding for supply of mixed rare earth carbonate*. Obtenido de Solvay: <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-and-hastings-sign-memorandum-understanding-supply-mixed-rare-earth-carbonate-0>
- SMM. (2024). *RE Carbonate Price, CNY/mt*. Obtenido de SMM: <https://www.metal.com/Concentrate/201102250378>
- SMM. (2024). *Última actualización del mercado de óxidos de tierras raras de SMM*. Obtenido de SMM : <https://www.metal.com/Rare-Earth-Oxides>
- SEIA. (2023). *Resolución de término anticipado*. Obtenido de <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=2023/07/03/8876-399d-4592-bc2f-15d6b5035986>

- Sadri, F., Nazari, A., & Ghahreman, A. (2017). *Una revisión sobre los procesos de craqueo, horneado y lixiviación de concentrados de elementos de tierras raras*. ELSEVIER.
- Tierras Raras. (2024). Obtenido de REIA: <https://global-reia.org/rare-earth/>
- USGS. (2023). *Recursos minerales críticos de los Estados Unidos: geología económica y ambiental y perspectivas de suministro futuro*.
- USGS. (2024). *Industria de las tierras raras en China*.
- USGS. (2024). *Resumen Minerales Commodities 2024*.
- USGS. (2023). *El depósito de tierras raras de Mount Weld, Australia Occidental: una laterita derivada de carbonatita*. Obtenido de USGS: <https://www.usgs.gov/publications/mount-weld-rare-earth-element-deposit-western-australia-a-carbonatite-derived-laterite>
- Valderrama, L. I., & Enrique, M. (2019). *Recovery of pyrite from copper tailings by flotation*. Obtenido de Repositorio Académico Universidad de Atacama: <https://repositorioacademico.uda.cl/handle/20.500.12740/15772>
- Valderrama, L., Gonzalez, M., Santander, M., & Zazzali, B. (2018). *RECUPERACIÓN DE COBRE CONTENIDO EN ESCORIA DE COBRE MEDIANTE FLOTACIÓN*. HOLOS.
- Yianatos, J. (2015). *Flotación de minerales: fundamentos, tecnología y aplicación*. USM.
- Yong Cheng, C., Pranolo, Y., & Zhu, Z. (2015). *Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production – A review*. ELSEVIER.
- Zhang, Y., & al., e. (2020). *Recuperación hidrometalúrgica de elementos de tierras raras a partir de chatarra de imanes permanentes de NdFeB: una revisión*. Metals.
- Zhang, W., & Honaker, R. (2017). *Un estudio fundamental de la adsorción de ácido octanohidroxámico en superficies de monacita*. ELSEVIER.

14 Anexos

Anexo A: “Memoria de cálculo balance de masa etapa beneficio”

En el espiral, la alimentación es 40% sólidos y 60% agua. Los balances se presentan en las ecuaciones 23 y 24, respectivamente.

$$F_5 = F_6 + F_{17} \quad (23)$$

$$F_5 = F_6 + F_{17} + F_{18} \quad (24)$$

En el caso de los sólidos la eficiencia del proceso de separación gravimétrica se estima en un 95%, por ende, en la corriente 6 el porcentaje de ganga disminuye un 95%, también el agua se distribuye en las corrientes 6,17 y 18 y los flujos másicos de los otros componentes se mantienen.

Luego, para el proceso de flotación se supone un porcentaje en peso de agua del 80%, por lo que se añade agua, a través de la corriente 21. Para calcular el agua se realizan los siguientes cálculos:

- i. Los sólidos de la corriente 6 tienen que representar el 20% de la corriente 7.
- ii. Entonces, el flujo total de la corriente 7 será:

$$F_7 = \frac{F_{ganga,6} + F_{RE,6} + F_{Cu,6}}{0,2} \quad (25)$$

- iii. Ahora el agua total en la corriente se calcula utilizando la ecuación 26.

$$F_{agua,4} = F_4 \cdot 0,8 \quad (26)$$

Debido a que el proceso de flotación de cobre separa los minerales de cobre de los minerales de ganga, a partir de este momento se diferenciarán los minerales en función de su contenido de cobre, tierras raras y ganga, en lugar de clasificarlos como sólidos.

Para realizar los balances en esta etapa se parte desde la recuperación total de cobre calculado en la sección de Balance de Masa Global y se siguen los siguientes pasos:

- i. La recuperación de cobre es del 90% y el concentrado se estima en una pureza de 20% cobre. Por lo tanto, el flujo de la corriente 25 es:

$$F_{25} = \frac{F_{Cu,25}}{0,2} \quad (27)$$

- ii. Ahora esta corriente proviene del sedimentador SD-300-01 el cual es alimentado por la corriente 22. Entonces, ya que la función de un sedimentador es separar los sólidos suspendidos en líquido, la corriente 26 corresponde a agua. Para determinar los balances, se va a suponer que el sedimentador opera con 20% sólidos, por ende la corriente 22 es:

$$F_{22} = \frac{F_{25}}{0,2} \quad (28)$$

- iii. Para determinar el flujo másico de ganga en la corriente 22, este es el mismo de la corriente 25.

$$F_{ganga,22} = F_{ganga,25} \quad (29)$$

- iv. Lo mismo ocurre con el flujo másico de concentrado de cobre. Este es el mismo de la corriente 25.

$$F_{Cu,22} = F_{Cu,25} \quad (30)$$

El proceso que sigue es la flotación de tierras raras y la corriente de alimentación es la 8. El flujo total es la diferencia entre las corrientes 7 y 22:

$$F_8 = F_7 - F_{22} \quad (31)$$

Para determinar la composición de la corriente 8:

- i. El agua de la corriente 8 se calcula con la ecuación 32.

$$F_{agua,8} = F_{agua,7} - F_{agua,22} \quad (32)$$

El flujo másico de tierras raras se mantiene, ecuación:

$$F_{RE,7} = F_{RE,8} \quad (33)$$

- ii. El flujo de cobre es lo residual de lo flotado en la corriente 22. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{Cu,8} = F_{Cu,7} - F_{Cu,22} \quad (34)$$

- iii. La ganga se calcula de la siguiente forma:

$$F_{ganga,8} = F_8 - F_{agua,8} - F_{TR,8} - F_{Cu,8} \quad (35)$$

La corriente 8 ingresa al proceso de flotación de tierras raras, donde la corriente 9 es la de interés. Se estima que esta es el 20% de la corriente. La composición de la corriente 9 se calcula de la siguiente forma:

- i. La corriente 27 es:

$$F_{27} = F_8 \cdot 0,8 \quad (36)$$

- ii. Entonces, dado que la corriente 27 que ingresa al sedimentador debe tener un porcentaje de agua de 80%, es que la diferencia de agua queda en la corriente 9 se calcula de la siguiente manera:

$$F_{agua,9} = F_{agua,8} - (F_{27} \cdot 0,8) \quad (37)$$

- iii. Para obtener flujo de tierras raras, se estima una eficiencia del 80%, por tanto:

$$F_{RE,9} = F_{RE,8} \cdot 0,8 \quad (38)$$

- iv. Para el cobre, se espera un arrastre de estos minerales del 80%. Entonces, el flujo de cobre es:

$$F_{Cu,9} = F_{Cu,8} \cdot 0,8 \quad (39)$$

- v. Para determinar el flujo de ganga, es conocido el porcentaje de sólidos, 20%, este valor multiplicado por la corriente total resulta el flujo másico de sólidos. Entonces, a este valor se le resta el flujo de tierras raras y cobre, quedando de la siguiente forma:

$$F_{ganga,9} = (F_9 \cdot 0,80) - F_{TR,9} - F_{Cu,9} \quad (40)$$

- vi. Calculados los componentes de la corriente 9, se puede determinar los flujos de la corriente 27, los cuales serán la diferencia de la corriente 8 con la 27, tanto para las tierras raras, cobre y ganga.

El último proceso de la etapa de beneficio es el sedimentador para recuperar el agua. La corriente de interés en la número 10 y para determinar su flujo total se siguen los siguientes pasos:

- i. El flujo másico de ganga, tierras raras y cobre es el mismo de la corriente 9:

$$F_{ganga,10} = F_{ganga,9} \quad (41)$$

$$F_{TR,10} = F_{TR,9} \quad (42)$$

$$F_{Cu,10} = F_{Cu,9} \quad (43)$$

- ii. Ahora estos flujos componen la fracción sólida de la corriente. Entonces, la corriente total es:

$$F_{10} = \frac{F_{ganga,9} + F_{TR,9} + F_{Cu,9}}{0,8} \quad (44)$$

- iii. El flujo de agua es el 20% de la corriente 10.

Anexo B: “Memoria de cálculo balance de masa etapa Hidrometalurgia”

La etapa de hidrometalurgia comienza con la corriente 10 e ingresa al proceso de cracking con ácido sulfúrico.

Desde ahora en adelante, como hay reacciones químicas es importante trabajar con el mineral de tierras raras, no obstante, la cantidad de tierras raras es la misma y es la que se incluye en las tablas de balances. Entonces, para obtener el flujo de $REPO_4$, se utiliza la ley promedio de las tierras raras en el mineral fosfato. Entonces, aplicando la ecuación 44 se obtiene el flujo de $REPO_4$.

$$F_{REPO_4} = \frac{F_{RE}}{\text{Promedio Ley}_{RE,REPO_4}} \quad (45)$$

Ahora, el consumo de ácido se determina utilizando la relación mencionada en la sección 6.6.2.1, donde se indica que la relación ácido: concentrado es de 1:2,5. Entonces, con el valor del flujo de $REPO_4$, el consumo de ácido es:

$$\text{Consumo de ácido} = 2,5 \cdot F_{REPO_4} \quad (46)$$

Que corresponde al 100% de la corriente 23.

Luego de la reacción, las especies que quedan en el PLS, corriente 11, son: sulfato de tierras raras de formula $(RE)_2(SO_4)_{3(s)}$ y ácido fosfórico de formula $2H_3PO_4$.

Para obtener el flujo másico de la especie $(RE)_2(SO_4)_{3(s)}$ se siguen los siguientes pasos:

- i. La especie fosfatada de tierras raras se divide por el peso molecular, que en este caso se supondrá como el promedio de todas las tierras raras fosfatadas
- ii. Luego, en la tabla de reacción química para determinar la formación y consumo de cada componente se utiliza la relación estequiométrica.
- iii. Por último, para obtener el flujo másico de $(RE)_2(SO_4)_{3(s)}$ se multiplica por el peso molecular promedio de las especies sulfatas.
- iv. Para el resto de las especies. El agua, ganga y cobre es la misma. Ecuaciones 47, 48 y 49. Lo mismo ocurre con los elementos de tierras raras, ya que si bien ocurre un cambio en su estructura, lo que se mide son los elementos solos y lo que acompaña, ya sean los fosfatos o sulfatos están considerados dentro de la ganga.

$$F_{agua,11} = F_{agua,10} \quad (47)$$

$$F_{ganga,11} = F_{ganga,10} \quad (48)$$

$$F_{Cu,11} = F_{Cu,10} \quad (49)$$

$$F_{RE,11} = F_{RE,10} \quad (50)$$

- v. Por último, la corriente total es la suma de todos los componentes, ecuación 51.

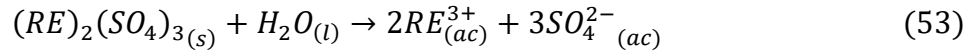
$$F_{11} = F_{agua,11} + F_{ganga,11} + F_{Cu,11} + F_{TR,11} + F_{H_3PO_4,11} \quad (51)$$

Ahora en la en la lixiviación con agua para calcular el consumo de agua se utiliza la relación sólido líquido de 1:7. Por lo tanto, el consumo se calcula con la siguiente ecuación.

$$F_{agua,24} = F_{(RE)_2(SO_4)_{3,11}} \cdot 7 \quad (52)$$

Además, dado que las especies de interés sufren un cambio en su estado físico es que es necesario determinar nuevamente cuantos iones de tierras raras se obtienen en la solución. Para ello, se

determina la concentración de RE_{ac}^{3+} mediante la relación estequiométrica de la reacción presentada a continuación:



Para determinar el flujo de todos los componentes de la corriente 12 se siguen los siguientes pasos:

- i. Se incluye un flujo del ion sulfato ($SO_4^{2-}_{(ac)}$).
- ii. El flujo de agua corresponde al agua de la corriente de alimentación de esta operación, que es la corriente 11 más el agua agregada para la reacción:

$$F_{agua,12} = F_{agua,11} + F_{agua,24} \quad (54)$$

- iii. Los flujo de ganga, tierras raras, cobre y ácido fosfórico se mantienen:

$$F_{ganga,12} = F_{ganga,11} \quad (55)$$

$$F_{RE,12} = F_{RE,11} \quad (56)$$

$$F_{Cu,12} = F_{Cu,11} \quad (57)$$

$$F_{H_3PO_4,12} = F_{H_3PO_4,11} \quad (58)$$

- iv. Por último, el flujo total de la corriente está dado por la suma de todos los componentes:

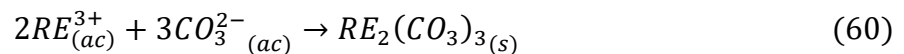
$$F_{12} = F_{agua,12} + F_{ganga,12} + F_{TR,12} + F_{Cu,12} + F_{H_3PO_4,12} + F_{SO_4^{2-},12} \quad (59)$$

Puesto que en el proceso de lixiviación los elementos de interés se encuentran en la fase líquida, es necesario filtrar esa solución para eliminar todas las impurezas sólidas.

Entonces, se va a suponer que en esta etapa un factor de separación de la ganga de 0,1%, es decir, que se eliminará el 99,9% de la ganga proveniente de la corriente 9.

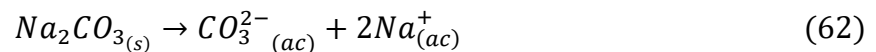
El resto de los componente continúan, ya que se encuentran disueltos en agua, y de esa forma se completa el flujo de la corriente 13.

La última etapa para obtener la mezcla de carbonatos es precipitar la solución de la corriente 13 con carbonato de sodio. Para calcular el consumo de este reactivo se utilizará la relación estequiométrica de 3:2, ver ecuación 60. De esta forma se obtiene el consumo en mol/h, entonces para obtener el valor en t/h, se multiplica por el peso molecular de la especie y se divide en 10^6 , ecuación 61.



$$Consumo Na_2CO_3 = \frac{(1,5 \cdot moles de Re^{3+}) \cdot PM_{CO_3^{2-}}}{10^6} \quad (61)$$

El peso molecular es de la especie ion carbonato, ya que el carbonato de disuelve en el agua de acuerdo con la siguiente reacción:



Para asegurar la mayor precipitación se estima un exceso del 100%.

El resto de los componentes mantienen su flujo másico:

$$F_{agua,14} = F_{agua,13} \quad (63)$$

$$F_{ganga,14} = F_{ganga,13} \quad (64)$$

$$F_{RE,14} = F_{RE,13} \quad (65)$$

$$F_{Cu,14} = F_{Cu,13} \quad (66)$$

$$F_{H_3PO_4,14} = F_{H_3PO_4,13} \quad (67)$$

$$F_{SO_4^{2-},14} = F_{SO_4^{2-},13} \quad (68)$$

Finalmente, la corriente 14 se filtra y la fracción sólida es de interés, corriente 15. Se recupera agua del proceso y el producto está terminado.

La composición de la corriente 15 se determina de la siguiente forma:

- i. Se elimina toda el agua y cobre proveniente de la corriente 14.
- ii. El flujo de las tierras raras se divide en 0,45% y se obtiene el flujo total:

$$F_{15} = \frac{F_{RE,15}}{0,45} \quad (69)$$

- iii. Con el flujo total, al restarle el flujo de tierras raras se obtiene el flujo de ganga:

$$F_{ganga,15} = F_{15} - F_{RE,15} \quad (70)$$

Anexo C: “Cálculo de precio de carbonato mixto de tierras raras”

Para calcular el precio de venta se siguen los siguientes pasos:

- i. Según lo indicado por ENAMI(ENAMI, 2024) el precio de venta del cobre es de 8.730 USD/ton.
- ii. Dado que la cantidad de cobre en el concentrado es del 20% el valor del cobre puro contenido se calcula con la ecuación 71, obteniendo 1.746 USD/ton.

$$\frac{8.730\text{USD}}{\text{ton}} \cdot 20\% = 1.746 \frac{\text{USD}}{\text{ton}} \quad (71)$$

- iii. La ENAMI paga 1.483 USD/ton por el mismo concentrado. Este valor es menor que el valor del contenido de cobre puro calculado del mercado. Entonces se calcula un factor de pago, de acuerdo con la ecuación 72, obteniendo un factor de 0,85.

$$\frac{\text{Precio ENAMI}}{\text{Precio mercado}} = 0,85 \quad (72)$$

- iv. Entonces si el precio del carbonato mixto de tierras raras es de 4.821 USD/ton, y está calculado en función de lo que se puede obtener como metales finos, es por este motivo que solo se multiplicará por el factor de pago obteniendo 4.095 USD/ton.

$$4.821 \cdot 0,85 = 4.095 \frac{\text{USD}}{\text{ton}} \quad (73)$$