



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

**FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL EN MINAS
SEDE BELLAVISTA**

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MREC

DESDE RELAVES FÉRRICO-APATÍTICOS EN CHILE:

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y ESTRATÉGICA

Trabajo de Proyecto de Título para optar al Título de Ingeniera Civil en Minas

Profesor Tutor: PhD Roberto Acevedo Llanos

Estudiante: Tamara Betzabeth Roblero Sanzana



© Tamara Betzabeth Roblero Sanzana

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya una cita bibliográfica del documento.

Santiago, Chile

2025



*A mi madre, quien desde el cielo ilumina mi camino
y me ha guiado con su amor. Su espíritu vive en este logro.
A mi padre, por ser mi roca, mi ejemplo de fortaleza
y mi apoyo incondicional en cada paso de este difícil camino.*



AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor tutor, Dr. Roberto Acevedo, cuya guía y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo y la conclusión de este proyecto.

Asimismo, agradezco a la universidad por darme la oportunidad de continuar con este sueño y por confiar en mí, y a mis profesores por todo el conocimiento impartido.

A mis padres, David y Gladis, por entregarme las herramientas y todo su amor durante todos los años de mi vida; me hicieron inmensamente feliz. A mis hermanos, Erwin y Alejandra, y sobrinas, Michelle, Kimberly, Antonia y Megan, por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

A mis amigos incondicionales de la vida, quienes, con su amistad, han sido una motivación para alcanzar mis metas profesionales y cuya compañía me sostuvo en los malos momentos.

Finalmente, a mis "perrhijos", Coco y Minnie, por su invaluable y alegre compañía en las largas noches de estudio.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de recuperar elementos de tierras raras (REE) a partir de relaves férrico-apatíticos en Chile, con énfasis en la Región de Coquimbo. La investigación consideró la caracterización geoquímica y mineralógica de los relaves, así como el desarrollo de un proceso de reprocesamiento basado en tecnologías de preconcentración magnética, lixiviación ácida y extracción por solventes (SX).

Se determinó que la recuperación de tierras raras es técnicamente viable, siendo los principales elementos recuperables el lantano y el neodimio. El análisis de los balances de masa y energía mostró una eficiencia operativa acorde con los requisitos del proceso, mientras que el análisis ambiental evidenció una huella de carbono menor que la de procesos primarios de extracción.

El análisis económico, realizado mediante simulación de Monte Carlo, mostró que el valor actual neto (VAN) del proyecto es sensible a variables como la ley de TREO, los precios del MREC y los costos operativos. Si bien el VAN resultó negativo en la mayoría de los escenarios, se identificaron condiciones operativas que podrían generar resultados positivos, especialmente mediante la optimización de costos y la mejora de la comercialización del MREC.

En conclusión, se comprobó que la recuperación de REE a partir de relaves en la Región de Coquimbo es una alternativa técnica y ambientalmente viable. Sin embargo, la viabilidad económica está condicionada por la optimización del proceso y las condiciones de mercado.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of recovering rare earth elements (REEs) from ferric–apatitic mine tailings in Chile, with particular emphasis on the Coquimbo Region. The research comprised comprehensive geochemical and mineralogical characterisation of the tailings, together with the development of a reprocessing flowsheet based on magnetic preconcentration, acid leaching, and solvent extraction (SX) technologies.

The results indicate that REE recovery is technically feasible, with lanthanum and neodymium identified as the principal recoverable elements. Mass and energy balance analyses demonstrated operational efficiencies consistent with the requirements of the proposed process. At the same time, the environmental assessment indicated a lower carbon footprint than conventional primary rare-earth extraction routes.

The economic evaluation, performed using Monte Carlo simulation, showed that the project's net present value (NPV) is susceptible to key variables, including total rare earth oxide (TREO) grade, mixed rare earth carbonate (MREC) prices, and operating costs. Although the NPV was negative in most simulated scenarios, specific operational conditions yielding positive economic outcomes were identified, particularly through cost optimisation and enhanced MREC commercialisation strategies.

In conclusion, the recovery of REEs from mine tailings in the Coquimbo Region is confirmed as a technically and environmentally viable alternative. However, its economic viability remains dependent on further process optimisation and favourable market conditions.

Tabla de contenido

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MREC DESDE RELAVES FÉRRICO-APATÍTICOS EN CHILE: EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y ESTRATÉGICA	0
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	14
<i>Objetivo general</i>	14
<i>Objetivos específicos</i>	14
1.4 JUSTIFICACIÓN	14
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	15
1.6 ANÁLISIS PESTEL DEL ENTORNO DEL PROYECTO	15
1.6.1 Político	15
1.6.2 Económico	15
1.6.3 Social	15
1.6.4 Tecnológico	15
1.6.5 Ambiental	16
1.6.6 Legal	16
CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO	16
2.1 Propiedades generales de los REE	20
2.2 CLASIFICACIÓN DE REE	23
2.2.1 Tierras Raras Ligeras (LREE)	23
2.2.2 Tierras Raras Pesadas (HREE)	23
2.3 GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA	24
2.3.1 Monacita	25
2.3.2 Bastnasita	25
2.3.3 Xenotima	26
2.3.4 Allanita	26
2.3.5 Loparita	27
2.3.6 Eudialita	27
2.3.7 Arcillas iónicas	28
2.4 TIPOS DE DEPÓSITOS	29
2.4.1 Depósitos en Carbonatitas	30
2.4.2 Depósitos Asociados a Complejos Ígneos Alcalinos y Peralcalinos	30
2.4.3 Depósitos en Rocas Metamórficas y Sedimentarias	31
2.4.4 Depósitos de Placer	31
2.4.5 Depósitos de Arcillas Iónicas (REE-HR)	31
2.4.6 Depósitos Asociados a Uranio e IOCG	31
2.4.7 Fuentes Secundarias: Relaves	31
2.5 SEPARACIÓN DE REE	32
2.5.1 Caracterización Mineralógica	33
2.5.2 Concentración Física	38
2.5.3 Flotación	40

2.5.4 Lixiviación	42
2.5.5 Purificación y Separación	43
2.5.6 Metodos de obtención de REE	48
CAPÍTULO III: MERCADO, NEGOCIO Y CONTEXTO ESTRATÉGICO	55
GLOSARIO TÉCNICO	55
3.1 RESERVAS MUNDIAL	56
3.2 PRODUCCIÓN MUNDIAL	61
3.2.1 Usos	64
3.3 MERCADO GLOBAL	68
3.3.1 Mercado OTC	68
3.3.2 Demanda Global	71
3.3.3 Oferta Global	71
3.4 FIJACIÓN DE PRECIO	71
3.4.1 Volatilidad de los Precios de REE	74
3.4.2 Modelos de proyección económica	75
3.5 MERCADO DE MREC COMO PRODUCTO INTERMEDIO	79
3.5.1 Demanda mundial de MREC	79
3.5.2 Oferta mundial de MREC	81
3.5.3 Formación de Precio	82
3.6 IMPORTANCIA ESTRATÉGICA	85
3.7 PROYECTOS ACTUALES EN CHILE	86
I. Sierra Áspera (Región de Atacama)	86
II. Cerro Carmen (Región de Atacama)	87
Métodos de procesamiento previstos/ensayados	87
III. Botaderos Isidora (Región de Antofagasta)	87
IV. Proyecto Biolantánidos / Aclara (Penco, Región del Biobío)	88
CAPÍTULO IV: RELAVES Y OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA CHILE	89
4.1 RELAVE	89
4.1.2 Proceso de Manejo de Relaves en Chile	90
4.1.3 Métodos de disposición y diseño de tranques de relave	91
4.1.4 Componentes Principales de disposición de relaves	96
4.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS Y FÍSICAS DE LOS RELAVES	99
4.2.1 Granulometría	99
4.2.2 Mineralogía	100
4.2.3 Mena Original	101
4.2.4 Gangas Y Minerales Residuales	102
4.2.5 Yacimiento de origen	103
4.3 RELAVES EN CHILE: CATASTRO SERNAGEOMIN	103
4.3.1 Minerales portadores de REE por región	106
4.3.2 Tipos de relaves con alto potencial económico para REE	108
4.4 RUTAS DE EXTRACCIÓN DE REE APLICABLES A RELAVES	110
4.4.1 Elementos Críticos y Tierras Raras (REE) en Relaves Chilenos	111
4.5 OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA: POTENCIAL DE MREC PARA CHILE	126
CAPÍTULO V: BENCHMARK INTERNACIONAL Y KPIS DEL PROYECTO	130
5.1 BENCHMARK: PROYECTOS MUNDIALES COMPARABLES CON CHILE	130
5.1.1 Phalaborwa (Sudáfrica) – Descripción General	131
5.1.2 ReeMAP (Suecia) – Descripción General	132
5.1.3 Proyectos de arcillas iónicas: Módulo Penco y Carina (Aclara)	132
5.2 VARIABLES CLAVE DEL BENCHMARK PARA RELAVES FÉRRICO-APATITA	133
5.3 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO	134
5.3.1 Integración de variables en el modelo económico de reprocesamiento	134
5.3.2 Comparación técnico-económica con proyectos globales	135
5.4 KPI RELEVANTES	146

5.4.1 KPI: Recuperación Metalúrgica Global (%R)	146
5.4.2 KPI: Ley de Concentrado de REE (TREO %)	146
5.4.3 KPI: Factor de Enriquecimiento (FE)	147
5.4.4 KPI: Consumo Específico de Reactivos (kg/t)	148
5.4.5 KPI: Consumo Específico de Agua (m ³ /t)	150
5.4.6 KPI: Consumo Específico de Energía (kWh/t)	151
5.4.7 KPI: Capacidad de Tratamiento (t/día)	152
5.4.8 KPI: Disponibilidad Operacional (%)	153
5.4.9 KPI: Costo Operacional Unitario (USD/t)	154
5.4.10 KPI: Huella de Carbono (kg CO ₂ /t)	156
5.4.11 KPI Eficiencia de Revalorización (%)	158
5.4.12 KPI: ÍNDICE DE RIESGO OPERACIONAL (RPN)	160
CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA	162
6.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	162
6.1.1 Descripción del modelo económico	162
6.2 VARIABLES CRÍTICAS DEL ESTUDIO	163
6.2.1 Ley de MREC (TREO)	164
6.2.2 Recuperación metalúrgica	167
6.2.3 Precio REO	168
6.2.4 CAPEX	170
6.2.5 OPEX	171
6.2.6 Recurso disponible y escala de planta	172
6.3 SIMULACIÓN MONTECARLO	173
CAPÍTULO VII: BALANCES DE MASA Y ENERGÍA DEL PROCESO MREC	176
7.1 MARCO GEOMETALÚRGICO DEL CASO COQUIMBO	176
7.2 CRITERIOS GENERALES PARA DEFINICIÓN DE CONSUMOS	176
7.2.1 Etapa 1: Separación magnética de baja intensidad (LIMS)	177
7.2.2 Etapa 2: Clasificación y deslamado	177
7.2.3 Etapa 3: Separación magnética de alta intensidad (WHIMS) ± flotación de apatita	178
7.2.4 Etapa 4: Lixiviación ácida con H ₂ SO ₄	178
7.2.5 Etapa 5: Purificación de solución rica (remoción de Ca y Fe)	179
7.2.7 Etapa 6: Separación y concentración de REE mediante SX/IX	179
7.2.8 Etapa 7: Precipitación de MREC, filtrado y secado	180
7.3 INTEGRACIÓN DE CONSUMOS Y BALANCE GLOBAL DEL FLOWSHEET	180
7.3.1 Justificación para modelación probabilística y análisis de sensibilidad	180
7.4 BASE DE CÁLCULO Y SUPUESTOS GENERALES	180
7.4.1 Balance de masa global del proceso	182
7.4.2 Derivación del factor relave → MREC	182
7.4.3 Caudal horario y producción horaria de MREC	183
7.4.2 Balance de masa por etapa: recuperación y acondicionamiento de relaves	184
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	184
8.1 UNIDAD FUNCIONAL Y LÍMITES DEL SISTEMA	184
8.2 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (LCI) BASADO EN BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	185
8.3 CONSUMO ENERGÉTICO: ANÁLISIS POR ETAPAS	186
8.4 FACTORES DE EMISIÓN Y HUELLA DE CARBONO	187
8.5 HUELLA HÍDRICA Y GESTIÓN DEL AGUA	188
8.6 REACTIVOS QUÍMICOS Y EMISIONES INDIRECTAS	188
8.7 COMPARACIÓN CON PRODUCCIÓN PRIMARIA DE TIERRAS RARAS	188
CAPÍTULO IX: RESULTADOS	189
9.1 ALCANCE Y NATURALEZA DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA	190
9.2 CASO BASE DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	191
9.2.1 Resultados de la simulación Monte Carlo del VAN	192

9.3 CASO EVALUACIÓN ECONÓMICA POR ETAPA	195
9.3.1 Análisis del OPEX unitario y consistencia económica	196
9.3.2 Distribución del VAN según escenario A vs escenario B.....	197
9.3.3 Análisis curva de riesgo (CDF del VAN)	197
9.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	198
9.4.1 Análisis de Sensibilidad basado en correlaciones de Spearman	198
9.4.2 Análisis Diagrama de Tornado de Sensibilidad del VAN total	200
9.4.3 Implicancias para el diseño y la estrategia del proyecto.....	201
9.5 DISCUSIÓN	202
9.5.1 Variabilidad geometalúrgica, justificación estadística y modelamiento probabilístico	202
9.5.2 Desempeño económico y resultados del análisis Monte Carlo	203
9.5.3 Sensibilidad económica: drivers críticos y riesgos operacionales	203
9.5.4 Riesgos metalúrgicos, ambientales y regulatorios	204
9.5.5 Perspectiva estratégica del proyecto para Chile.....	205
9.5.6 Condiciones de viabilidad futura del proyecto.....	206
CONCLUSIÓN	209
BIBLIOGRAFIA.....	211
ANEXOS	214

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de tierras raras	20
Tabla 2. Radios iónicos efectivos de Ln^{3+} (CN = 8) según Shannon (Å).	21
Tabla 3. Propiedades inherentes a la contracción lantánida.	22
Tabla 4. Tabla comparativa de las características principales de la clasificación de REE.....	23
Tabla 5. Tabla comparativa de las principales menas de ERR's.....	29
Tabla 6. Técnicas de análisis físico-químicos de caracterización de tierras raras.	33
Tabla 7. Comparativa de técnicas de análisis físico-químicas y los costos asociados.	37
Tabla 8. Métodos de concentración física para minerales de REE.	40
Tabla 9. Principales reactivos para flotación de minerales de REE.	42
Tabla 10. Ruta de lixiviación según minerales mena de REE.	43
Tabla 11. Recuperación por tipo de mena de REE según la ruta de purificación y separación.....	48
Tabla 12. Producción primaria de REE a partir de minerales.....	48
Tabla 13. Recuperación según tipo de mena de REE.....	55
Tabla 14. Reservas mundiales de ETR, años 2022 y 2023.	58
Tabla 15. Estimación de recursos en prospectos de ETR en Chile.....	60
Tabla 16. Producción mundial de ETR y tipos de depósitos, años 2022 y 2023.	61
Tabla 17. Composición aproximada y método de fabricación de distintos tipos de imanes permanentes.....	64
Tabla 18. Resumen comparativo entre mercado OTC y Bursátil.	69
Tabla 19. Elementos que se estructuran en contratos off-take.	70
Tabla 20. Productos comercializables de REE.....	73

Tabla 21. Precios estimados según concentración de óxidos de tierras raras.	74
Tabla 22. Proyecciones de precios según Mean Reversion.....	77
Tabla 23. Proyecciones de precios según Basket Price.....	78
Tabla 24. Proyecciones de precios según Escenarios USGS	79
Tabla 25. Proyectos actuales en Chile de REE.....	86
Tabla 26. Granulometría típica de relaves por tipo de mena.....	99
Tabla 27. Mineralogía predominante en relaves por región	102
Tabla 28. Arcillas presentes en relaves por región.....	102
Tabla 29. Análisis de estado y distribución regional de relaves en Chile.	105
Tabla 30. Resumen potencial de relaves en Chile	105
Tabla 31. Tablas comparativas de REE por región y tipo de relave	107
Tabla 32. Resumen por región de caracterización según yacimiento proveniente.	110
Tabla 33. Precios de referencia para MREC según escenario de proyección de demanda.	129
Tabla 34. Benchmarking internacional para OPEX según tipo de planta.	155
Tabla 35. Benchmarking de huella de carbono según tipo de planta	157
Tabla 36. Benchmarking de índice de riesgo operacional (RPN)	161
Tabla 37. Análisis descriptivo de las variables claves utilizadas en Monte Carlo.	174
Tabla 38. Variables base para balances y KPI (caso base)	181
Tabla 39. Inventario por unidad funcional (1 t de MREC).....	185
Tabla 40. Consumo por tonelada de relave.	186
Tabla 41. Consumo por etapa del proceso.	186
Tabla 42. Emisiones indirectas por electricidad (tCO ₂ e/ t MREC) bajo diferentes escenarios.	187
Tabla 43. Tipo de distribución empleados en la simulación Monte Carlo para cada variable.....	190
Tabla 44. Síntesis de resultados de caso base en simulación Monte Carlo... ..	192
Tabla 45. Estadísticas de VAN caso base en simulación Monte Carlo.	194
Tabla 46. Comparación de resultados económicos – Escenario A vs Escenario B (realista).	196
Tabla 47. Coeficientes de correlación Spearman entre las variables clave y el VAN.....	199

Índice de Figuras

Figura 1. Gráfico contracción lantánida	21
Figura 2. Reparto de reservas mundiales de REE (2024).	57
Figura 3. Gráfico reserva de REO por países incluyendo Chile.	58
Figura 4. Producción de REE por países.	61
Figura 5. Gráfico Proyecciones de precios- Mean Reversion.....	76
Figura 6. Gráfico proyecciones de precio - Basket Price.....	78
Figura 7. Gráfico proyecciones de precios - Escenarios USGS.	79
Figura 8. Distribución regional de tranques agua arriba.....	95
Figura 9. Esquema de embalse relaves.	96

Figura 10. Partes de un depósito de relaves en general.	96
Figura 11. Estado de depósitos de relaves en Chile.	104
Figura 12. Distribución regional de depósitos inactivos y abandonados 2025.	105
Figura 13. Distribución de VAN del caso base.	194
Figura 14. Curva de riesgo del VAN caso base.....	195
Figura 15. Comparación de distribución del VAN (A vs B).	197
Figura 16. Curva de riesgo para ambos casos (A vs B).	198
Figura 17. Diagrama de tornado - Sensibilidad del VAN total.	201

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Monacita	25
Ilustración 2. Bastnasita	26
Ilustración 3. Xenotima	26
Ilustración 4. Allanita	27
Ilustración 5. Loparita	27
Ilustración 6. Eudialita	28
Ilustración 7. Arcillas iónicas.	28
Ilustración 8. Esquema de los tipos de depósitos de ERR's y su contexto tectónico.....	30
Ilustración 9. Distribución de los depósitos de REE, categorizados por tipos de depósitos y estado de avance del yacimiento.	30
Ilustración 10. Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	34
Ilustración 11. Plasma Acoplado Inductivamente (ICP).....	35
Ilustración 12. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	35
Ilustración 13. Difracción de Rayos X (XRD).....	36
Ilustración 14. Método CPT-XRF (Cone Penetration Test con XRF).....	36
Ilustración 15. Principales países con más reservas de REE.	57
Ilustración 16. Distribución de los yacimientos mundiales de ERR.	59
Ilustración 17. Minerales críticos en territorio chileno.	60
Ilustración 18. Esquema de un tranque de relaves.	93
Ilustración 19. Métodos constructivos de Tranques de Relaves.....	94
Ilustración 20. Concentración geográfica de depósitos de relaves en Chile. .	103

INTRODUCCIÓN

La transición energética global, el crecimiento de la electromovilidad y la expansión de las energías renovables han impulsado un aumento sostenido en la demanda de elementos de tierras raras (*Rare Earth Elements*, REE). Estos elementos, que comprenden a los lantánidos junto con el itrio y el escandio, poseen propiedades magnéticas, ópticas y electroquímicas únicas, siendo insumos críticos para la fabricación de imanes permanentes, motores eléctricos, turbinas eólicas, baterías avanzadas y diversas aplicaciones estratégicas en los sectores industrial, energético y de defensa.

No obstante su importancia, la producción y el procesamiento de tierras raras se encuentran altamente concentrados a nivel global, principalmente en China y, en menor medida, en Australia, lo que ha expuesto a las cadenas de suministro a riesgos geopolíticos y estratégicos. Frente a este escenario, la valorización de fuentes secundarias de REE ha cobrado relevancia como una alternativa para diversificar el abastecimiento y reducir la dependencia de la minería primaria.

En este contexto, los relaves mineros han dejado de ser considerados únicamente pasivos ambientales para posicionarse como potenciales yacimientos secundarios de elementos de valor. Chile, como país con una extensa tradición minera, posee un volumen significativo de relaves acumulados, muchos de los cuales contienen concentraciones relevantes de tierras raras asociadas a minerales férricos y fosfatados no recuperados en los procesos originales de beneficio. La revalorización de estos materiales representa una oportunidad concreta para avanzar hacia un modelo de minería más sustentable y alineado con los principios de economía circular.

Entre estos depósitos, los relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo destacan por su potencial como fuente secundaria de tierras raras livianas y medias, debido a la asociación de REE a fases fosfatadas tipo apatita y a la disponibilidad de grandes volúmenes de material previamente extraído. Estas características permiten proyectar esquemas de reprocesamiento orientados a la obtención de productos comercializables, como los carbonatos mixtos de tierras raras (*Mixed Rare Earth Carbonate*, MREC).

El presente Proyecto de Título evalúa la factibilidad técnica, económica y ambiental de la recuperación de tierras raras desde relaves férrico-apatíticos chilenos, integrando criterios propios de la Ingeniería Civil en Minas. El estudio considera la caracterización mineralógica y geoquímica del material, la definición de una ruta de procesamiento coherente con su mineralogía, el desarrollo de balances de masa y energía, la evaluación ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque *cradle-to-gate* y el análisis económico del proyecto mediante indicadores financieros y modelamiento probabilístico.

De este modo, esta investigación aporta una base técnica y estratégica para el desarrollo de proyectos de recuperación de tierras raras desde relaves mineros

en Chile, contribuyendo a la valorización de pasivos ambientales y al posicionamiento del país en la cadena de valor de los minerales críticos para la transición energética.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La transición energética global, la expansión de la electromovilidad y el crecimiento sostenido de tecnologías limpias han incrementado de forma estructural la demanda por elementos de tierras raras (Rare Earth Elements, REE), los cuales son insumos críticos para la fabricación de imanes permanentes, motores eléctricos, turbinas eólicas, baterías avanzadas y dispositivos electrónicos de alto desempeño. Sin embargo, la oferta global de estos elementos se encuentra altamente concentrada, principalmente en China y, en menor medida, Australia, lo que ha generado una elevada dependencia de las cadenas de suministro internacionales y una creciente exposición a riesgos geopolíticos, comerciales y estratégicos.

Paralelamente, la minería chilena ha generado históricamente grandes volúmenes de relaves mineros asociados principalmente a la explotación de cobre y hierro. Estos depósitos, que durante décadas han sido considerados pasivos ambientales, contienen concentraciones relevantes de elementos de valor que no fueron recuperados en los procesos originales de beneficio, entre ellos elementos de tierras raras asociados a fases minerales férricas y fosfatadas. La ausencia de tecnologías adecuadas, la falta de incentivos económicos y el bajo conocimiento estratégico de estos elementos explican su subaprovechamiento histórico.

En particular, los relaves férrico-apatíticos presentes en la Región de Coquimbo han sido identificados como materiales con potencial para la recuperación de tierras raras livianas y medias. No obstante, existe una brecha relevante de información técnica, económica y estratégica respecto a la viabilidad real de reprocesar estos relaves bajo condiciones de mercado actuales, considerando la variabilidad de leyes, recuperaciones metalúrgicas, costos de inversión y operación, y precios de productos comercializables como los carbonatos mixtos de tierras raras (MREC).

Esta situación configura un problema central para la industria minera nacional: la existencia de un recurso secundario potencialmente estratégico que, pese a su abundancia y localización favorable, no ha sido integrado de manera sistemática a la matriz productiva minera chilena, limitando la diversificación productiva, la generación de valor agregado y el avance hacia modelos de minería más sustentables.

1.2 Formulación del problema

Considerando el contexto descrito, el problema de investigación se formula en torno a la viabilidad técnica y económica de optimizar un proceso productivo para la recuperación de lantánidos desde relaves férrico-apatíticos chilenos, orientado a la producción de un concentrado comercializable de carbonatos mixtos de

tierras raras (MREC), bajo condiciones de incertidumbre propias de proyectos mineros en etapas tempranas.

Este planteamiento integra tanto la dimensión técnica del reprocesamiento de relaves, caracterización mineralógica, selección de la ruta de procesamiento y estimación de recuperaciones; como la dimensión económica, asociada a la evaluación de la rentabilidad y el riesgo del proyecto mediante indicadores financieros y herramientas probabilísticas.

1.3 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la recuperación de elementos de tierras raras desde relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo, mediante el diseño de un esquema de reprocesamiento que integre caracterización mineralógica, balances de masa y energía, análisis de ciclo de vida y evaluación económica bajo incertidumbre.

Objetivos específicos

- Caracterizar geoquímica y mineralógicamente relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo, identificando las fases minerales hospedantes de elementos de tierras raras y su potencial de recuperación.
- Evaluar tecnologías de clasificación, concentración y lixiviación, seleccionando un flowsheet técnicamente viable y coherente con la mineralogía de los relaves estudiados.
- Desarrollar los balances de masa y energía del proceso propuesto para la producción de MREC, identificando consumos críticos de reactivos, agua y energía.
- Evaluar el desempeño ambiental del proceso mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque *cradle-to-gate*, considerando indicadores relevantes como consumo energético, uso de agua y generación de residuos.
- Analizar la viabilidad económica del proyecto mediante modelamiento financiero determinístico y probabilístico (Monte Carlo), incorporando incertidumbre en variables clave como leyes, costos y precios.
- Analizar la contribución del reprocesamiento de relaves a la economía circular y a la valorización de pasivos mineros, en el contexto de los minerales críticos y la transición energética.

1.4 Justificación

Desde el punto de vista técnico, esta investigación permite avanzar en el conocimiento aplicado sobre el reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos, un tipo de depósito secundario aún poco explotado en Chile para la recuperación de tierras raras. El estudio contribuye a cerrar brechas de información respecto a rutas de procesamiento, potencial metalúrgico y limitaciones técnicas asociadas a este tipo de material.

Desde una perspectiva económica y estratégica, la valorización de relaves con contenido de REE representa una oportunidad para diversificar la matriz productiva minera chilena, reducir la dependencia de mercados concentrados y generar nuevos productos de alto valor agregado. Asimismo, el uso de herramientas probabilísticas fortalece la toma de decisiones en contextos de alta incertidumbre, habituales en proyectos mineros innovadores.

Finalmente, desde un enfoque ambiental y social, la recuperación de tierras raras desde relaves contribuye a la reducción de pasivos ambientales, al uso más eficiente de recursos ya extraídos y a la alineación de la minería chilena con los principios de economía circular y desarrollo sostenible.

1.5 Alcances y limitaciones

El estudio se desarrolla a nivel de evaluación técnico-económica conceptual, utilizando información secundaria, datos reportados por organismos oficiales y supuestos de ingeniería consistentes con proyectos de reprocesamiento de relaves. El análisis se centra en relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo y en la producción de MREC como producto final.

Entre las principales limitaciones se encuentra la ausencia de campañas de muestreo propias, ensayos metalúrgicos a escala piloto y estudios de ingeniería de detalle. Asimismo, no se aborda en profundidad la ingeniería de separación individual de óxidos de tierras raras ni la evaluación ambiental mediante estudios de impacto formal, los cuales quedan fuera del alcance de este trabajo.

1.6 Análisis PESTEL del entorno del proyecto

1.6.1 Político

El proyecto se enmarca en un contexto de creciente interés estatal por los minerales críticos y la revalorización de relaves mineros. Sin embargo, enfrenta desafíos asociados a la estabilidad regulatoria, permisos ambientales y políticas de fomento aún incipientes para tierras raras en Chile.

1.6.2 Económico

La rentabilidad del proyecto está fuertemente influenciada por la volatilidad de los precios internacionales de REE, los costos de capital y operación, y el acceso a financiamiento para proyectos innovadores. La producción de MREC permite mitigar parcialmente el riesgo asociado a la separación individual de elementos.

1.6.3 Social

La valorización de relaves puede mejorar la percepción social de la minería al reducir pasivos ambientales y generar nuevas oportunidades económicas locales. No obstante, requiere una adecuada gestión de expectativas y comunicación con comunidades cercanas.

1.6.4 Tecnológico

Existen tecnologías probadas para la recuperación de tierras raras, pero su adaptación a relaves férrico-apatíticos requiere ajustes técnicos y validación adicional. El desarrollo tecnológico es un factor crítico para el éxito del proyecto.

1.6.5 Ambiental

El reprocesamiento de relaves presenta beneficios ambientales asociados a la reducción de pasivos, aunque también genera nuevos flujos de residuos que deben ser gestionados adecuadamente para cumplir la normativa vigente.

1.6.6 Legal

El proyecto debe cumplir con la legislación minera y ambiental chilena, incluyendo normativas sobre relaves, residuos y evaluación ambiental, lo que puede impactar plazos y costos de implementación.

CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO

Los elementos de tierras raras (Rare Earth Elements, REE) comprenden el conjunto de los lantánidos (La–Lu), el itrio (Y) y el escandio (Sc), corresponden a 17 elementos químicos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio, escandio e itrio), con grandes similitudes fisicoquímicas como su configuración electrónica, potenciales de ionización, carácter altamente electropositivo y similitud en su radio iónico (+3), lo cual hace que los REE sean altamente intercambiables entre ellos en una gran cantidad de minerales, por medio de reacción de desplazamiento de metal. Su importancia estratégica ha crecido exponencialmente en las últimas décadas por su rol en la transición energética, la electrónica, la defensa y la medicina.

Aunque son relativamente abundantes en la corteza (130–240 µg/g), difícilmente forman yacimientos concentrados, lo que complejiza su extracción, lo que los convierte en recursos críticos desde el punto de vista geológico, económico y geopolítico. La producción mundial está fuertemente dominada por China (70–90% del suministro global), lo que ha generado una creciente presión geopolítica y la búsqueda de fuentes alternativas.

Escandio (Sc, Z=21)

- Configuración electrónica: [Ar] 3d¹ 4s²
- Masa atómica: 44,94 u
- Densidad: 2,99 g/cm³
- Punto de fusión: 1541°C
- Punto de ebullición: 2836°C
- Menas: Menas: thortveitita, lateritas Ni-Co, residuos de bauxita.
- Características: Ligero, resistente, usado en aleaciones Al-Sc, forma óxidos refractarios muy estables.

Itrio (Y, Z=39)

- Configuración electrónica: [Kr] 4d¹ 5s²
- Masa atómica: 88,91 u
- Densidad: 4,47 g/cm³
- Punto de fusión: 1526°C
- Punto de ebullición: 3338°C
- Menas: xenotima, monacita, gadolinita, arcillas iónicas.

- Características: Metal plateado, alta afinidad con O, esencial en fosforescentes y superconductos.

Lantano (La, Z=57)

- Configuración electrónica: [Xe] 5d¹ 6s²
- Masa atómica: 138,91 u
- Densidad: 6,15 g/cm³
- Punto de fusión: 920°C
- Punto de ebullición: 3464°C
- Menas: monacita, bastnasita, allanita.
- Características: Muy reactivo, blando, se oxida fácilmente, usado en vidrios ópticos y baterías NiMH

Cerio (Ce, Z=58)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹ 5d¹ 6s²
- Masa atómica: 140,12 u
- Densidad: 6,77 g/cm³
- Punto de fusión: 725°C
- Punto de ebullición: 3443°C
- Menas: Menas: monacita, bastnasita, cerianita.
- Características: El más abundante, útil en catalizadores automotrices y pulido óptico.

Praseodimio (Pr, Z=59)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f³ 6s²
- Masa atómica: 140,91 u
- Densidad: 6,77 g/cm³
- Punto de fusión: 931°C
- Punto de ebullición: 3520°C
- Menas: Monacita, Bastnasita
- Características: Metal maleable, aleaciones de alta resistencia, clave en imanes NdFeB al mejorar coercitividad.

Neodimio (Nd, Z=60)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁴ 6s²
- Masa atómica: 144,24 u
- Densidad: 7,01 g/cm³
- Punto de fusión: 1024°C
- Punto de ebullición: 3074°C
- Menas: Menas: monacita, bastnasita.
- Características: Base de los imanes NdFeB de alta potencia

Prometio (Pm, Z=61)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁵ 6s²
- Masa atómica: 145 u
- Densidad: 7,26 g/cm³
- Punto de fusión: 1100°C
- Punto de ebullición: 3000°C

- Menas: No posee menas naturales (radiactivo).
- Características: Radiactivo, no existe en estado natural estable, usado en fuentes beta.

Samarium (Sm, Z=62)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁶ 6s²
- Masa atómica: 150,36 u
- Densidad: 7,52 g/cm³
- Punto de fusión: 1072°C
- Punto de ebullición: 1794°C
- Propiedades: Metal duro, estable en aire seco, magnético.
- Usos: Imanes SmCo, reactores nucleares, óptica.
- Mena(s): Monacita, Bastnasita
- Características: Metal duro, estable en aire seco, magnético. Uso en imanes SmCo, reactores nucleares, óptica.

Europio (Eu, Z=63)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁷ 6s²
- Masa atómica: 151,96 u
- Densidad: 5,24 g/cm³
- Punto de fusión: 826°C
- Punto de ebullición: 1527°C
- Menas: Menas: monacita, bastnasita, arcillas iónicas.
- Características: Confiere fluorescencia roja en fósforos. Puede estabilizar estado +2. Usado en pantallas LED, tubos fluorescentes, absorbente neutrónico.

Gadolinio (Gd, Z=64)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁷ 5d¹ 6s²
- Masa atómica: 157,25 u
- Densidad: 7,90 g/cm³
- Punto de fusión: 1312°C
- Punto de ebullición: 3273°C
- Menas: Menas: gadolinita, monacita, bastnasita.
- Características: Gran momento magnético, buen absorbente de neutrones. Usado en resonancia magnética (contrastes), reactores nucleares.

Terbio (Tb, Z=65)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f⁹ 6s²
- Masa atómica: 158,93 u
- Densidad: 8,23 g/cm³
- Punto de fusión: 1356°C
- Punto de ebullición: 3230°C
- Menas: Monacita, Xenotima
- Características: Metal blando, estable al aire, paramagnético. Componente clave para imanes de alto rendimiento y fósforos verdes.

Disprosio (Dy, Z=66)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹⁰ 6s²
- Masa atómica: 162,50 u
- Densidad: 8,54 g/cm³
- Punto de fusión: 1412°C
- Punto de ebullición: 2567°C
- Menas: Menas: xenotima, arcillas iónicas.
- Características: Aumenta la coercitividad térmica en imanes Nd-Fe-B; estratégico para eólica.

Holmio (Ho, Z=67)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹¹ 6s²
- Masa atómica: 164,93 u
- Densidad: 8,80 g/cm³
- Punto de fusión: 1474°C
- Punto de ebullición: 2700°C
- Menas: Monacita, Xenotima
- Características: Metal relativamente blando, fuertemente paramagnético; usado en láseres médicos y nucleares.

Erbio (Er, Z=68)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹² 6s²
- Masa atómica: 167,26 u
- Densidad: 9,07 g/cm³
- Punto de fusión: 1529°C
- Punto de ebullición: 2868°C
- Menas: Monacita, Xenotima
- Características: Metal plateado, estable en aire, magnético; esencial en fibra óptica (amplificadores)

Tulio (Tm, Z=69)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹³ 6s²
- Masa atómica: 168,93 u
- Densidad: 9,32 g/cm³
- Punto de fusión: 1545°C
- Punto de ebullición: 1950°C
- Menas: Monacita, Xenotima
- Características: Metal raro, blando y maleable, muy raro; produce láseres de longitud de onda única.

Iterbio (Yb, Z=70)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹⁴ 6s²
- Masa atómica: 173,05 u
- Densidad: 6,97 g/cm³
- Punto de fusión: 824°C
- Punto de ebullición: 1196°C
- Mena(s): Monacita, Xenotima
- Características: : Metal blando, estable, propiedades superconductoras, usado en láseres de estado sólido, aleaciones, óptica IR

Lutecio (Lu, Z=71)

- Configuración electrónica: [Xe] 4f¹⁴ 5d¹ 6s²
- Masa atómica: 174,97 u
- Densidad: 9,84 g/cm³
- Punto de fusión: 1652°C
- Punto de ebullición: 3402°C
- Menas: xenotima, monacita.
- Características: El lantánido más pesado, raro y costoso; catalizador y aplicaciones médicas.

A continuación, en la Tabla 1 se resumen las principales propiedades químicas y físicas de las REE. Para posteriormente, ser analizadas en torno a las propiedades que éstas otorgan en su comportamiento.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de tierras raras

Elemento	Símbolo	N° Atómico	Clasificación	EDO	Peso atómico (g/mol)	Radio iónico (pm)
Lantano	La	57	LREE	+3	138.91	103
Cerio	Ce	58	LREE	+3, +4	140.12	102
Praseodimio	Pr	59	LREE	+3, +4	140.91	99
Neodimio	Nd	60	LREE	+3	144.24	98
Prometio	Pm	61	LREE	+3	[145]	97
Samario	Sm	62	LREE	+2, +3	150.36	96
Europio	Eu	63	LREE	+2, +3	151.96	95
Gadolinio	Gd	64	intermedio	+3	157.25	94
Terbio	Tb	65	HREE	+3, +4	158.93	92
Disproso	Dy	66	HREE	+3	162.50	91
Holmio	Ho	67	HREE	+3	164.93	90
Erbio	Er	68	HREE	+3	167.26	89
Tulio	Tm	69	HREE	+3	168.93	88
Yterbio	Yb	70	HREE	+2, +3	173.05	87
Lutecio	Lu	71	HREE	+3	174.97	86
Escandio	Sc	21	Asociado	+3	44.96	75
Itrio	Y	39	Asociado	+3	88.91	90

2.1 Propiedades generales de los REE

La configuración electrónica describe la distribución de electrones en orbitales atómicos. En los lantánidos, el llenado progresivo de los orbitales 4f explica propiedades magnéticas, ópticas y químicas singulares (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Cotton et al., 1999; Shannon, 1976).

La contracción lantánida es la disminución casi monotónica de los radios atómicos e iónicos a lo largo de la serie de los lantánidos (La → Lu). Se origina principalmente por el apantallamiento ineficiente de los electrones 4f, que permite que la carga nuclear efectiva aumente progresivamente y acerque las capas externas (5d/6s) al núcleo.

Obsérvese en el gráfico 1, la disminución suave desde La^{3+} (1.160 Å) hasta Lu^{3+} (0.977 Å) a coordinación constante, representando la contracción lantánida.

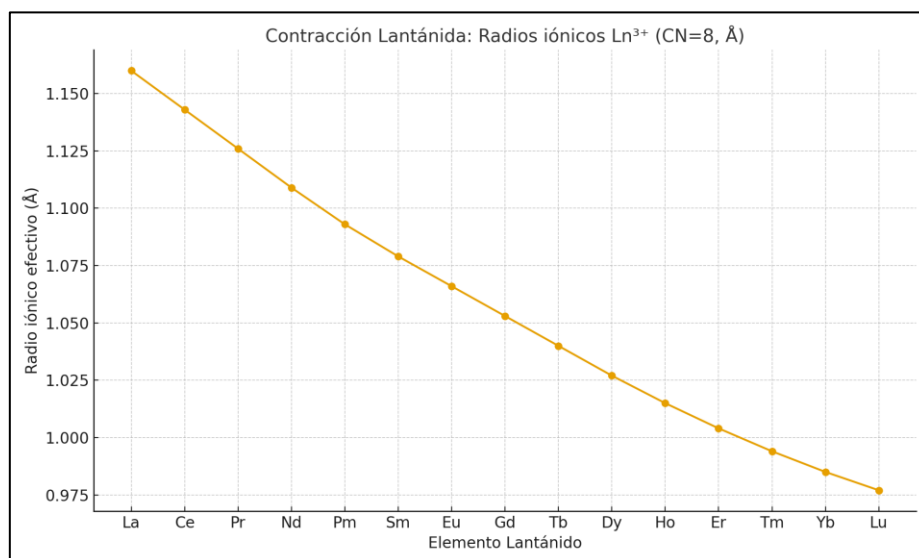


Figura 1. Gráfico contracción lantánida

El efecto pantalla describe cómo los electrones internos reducen la atracción coulombiana del núcleo sobre los electrones más externos. Las reglas de Slater permiten estimar la carga nuclear efectiva Z_{eff} asignando factores de apantallamiento por grupos (ns/np, nd, nf). Los electrones f apantallan menos eficazmente que d y que s/p; por ello, añadir electrones 4f a lo largo de los lantánidos incrementa Z_{eff} sobre 5d/6s y contrae el radio, valores que se muestra en la Tabla 2. Esto influye en densidad, solubilidad de compuestos y afinidad química.

Tabla 2. Radios iónicos efectivos de Ln^{3+} (CN = 8) según Shannon (Å).

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1.160	1.143	1.126	1.109	1.093	1.079	1.066	1.053	1.040	1.027	1.015	1.004	0.994	0.985	0.977

La densidad de los metales lantánidos tiende a aumentar a lo largo de la serie debido al incremento de la masa atómica acompañado de una disminución del volumen atómico. Al contraerse el radio atómico e incrementarse la masa, la densidad ($\rho = M/V$) aumenta, con excepción de europio e iterbio (Greenwood & Earnshaw, 2012; Cotton, Wilkinson & Gaus, 1999).

La contracción lantánida incrementa la carga efectiva (Z_{eff}) sobre los iones Ln^{3+} , aumentando su densidad de carga y, por ende, la energía de sus compuestos. Este efecto provoca que muchas sales poco solubles de los lantánidos (fluoruros, hidróxidos, carbonatos y fosfatos) sean menos solubles hacia el final de la serie. En particular, los productos de solubilidad (K_{sp}) de $\text{Ln}(\text{OH})_3$ disminuyen con el número atómico, reflejando una solubilidad decreciente de $\text{La}(\text{OH})_3$ a $\text{Lu}(\text{OH})_3$ (Baes & Mesmer, 1976; Marcus, 1997).

A medida que la contracción lantánida progresa, el ion Ln^{3+} se comporta como un ácido de Lewis más fuerte. Esto se traduce en una mayor afinidad por

ligandos duros oxigenados (donadores de O) como fosfatos, carboxilatos y poliaminocarboxilatos (EDTA, DTPA). En consecuencia, las constantes de estabilidad ($\log \beta$) de los complejos Ln–ligando aumentan de los lantánidos ligeros (LREE) a los pesados (HREE) (Rydberg, 1969; Choppin, 2003).

Obsérvese en la siguiente Tabla 3, el resumen de las propiedades metales lantánidos producto de la contracción del radio iónico.

Tabla 3. *Propiedades inherentes a la contracción lantánida.*

Propiedad	Tendencia (La $\rightarrow$ Lu)	Causa principal	Consecuencia química
Densidad	Aumenta	Disminución del radio y aumento de masa	Metales más densos y duros
Solubilidad de sales (OH^- , F^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-})	Disminuye	Mayor energía reticular y carga efectiva	Compuestos más insolubles
Afinidad química	Aumenta	Mayor acidez de Lewis del Ln^{3+}	Formación de complejos más estables

Estos efectos explican las diferencias físico-químicas observadas entre los lantánidos ligeros y pesados, y son fundamentales para comprender su comportamiento en procesos metalúrgicos, geoquímicos y de separación (Habashi, 1997; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Muchos iones lantánidos trivalentes (Ln^{3+}) exhiben momentos magnéticos efectivos elevados debido a la presencia de electrones desapareados en orbitales 4f. A diferencia de los metales de transición, los electrones 4f están parcialmente apantallados por las capas 5s/5p, lo que reduce el acoplamiento cristalino pero conserva altos momentos de espín y momento orbital. Iones como Dy^{3+} y Tb^{3+} presentan momentos efectivos elevados y anisotropía magnetocristalina fuerte, lo que es crucial para imanes permanentes de alto rendimiento; Nd^{3+} es clave en la fase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ y Sm^{3+} en $\text{SmCo}_5/\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (Coey, 2010; Jensen & Mackintosh, 1991; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Las transiciones electrónicas intraconfiguracionales 4f–4f de Ln^{3+} son en gran medida ‘protegidas’ por las capas 5s/5p, de modo que la influencia del entorno cristalino es relativamente débil y los espectros de emisión muestran líneas estrechas y colores ‘puros’. En fósforos, Eu^{3+} proporciona emisiones rojas intensas (p. ej., transición $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$), Tb^{3+} suministra verde ($^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$), mientras que $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ se emplean en emisión y conversión ascendente en el infrarrojo cercano (NIR) y visible. Por su parte, Eu^{2+} ($4f^7 \leftrightarrow 4f^6 5d^1$) presenta bandas anchas sensibles a la red anfitriona (Yen & Weber, 2004; Blasse & Grabmaier, 1994; Chakhmouradian & Wall, 2012).

La ‘paridad prohibida’ de 4f–4f se vuelve parcialmente permitida mediante mezcla de estados (interacción con modos de la red/ligandos), posibilitando eficiencias cuánticas elevadas en matrices adecuadas (granates, aluminatos, silicato-oxinitruros). Estos principios sustentan aplicaciones en pantallas, LEDs

de estado sólido, láseres y sondas bioópticas (Yen & Weber, 2004; Blasse & Grabmaier, 1994).

En términos generales en geoquímica, los LREE (La–Eu) se concentran en menas fosfatadas y carbonatadas como monacita y bastnasita, mientras que los HREE (Gd–Lu) y el itrio suelen ser más abundantes en xenotima (YPO_4) y en arcillas de adsorción iónica (IAD) formadas por meteorización de rocas portadoras, especialmente en ambientes subtropicales (Jordens, Cheng & Waters, 2013; Chakhmouradian & Wall, 2012; USGS, 2024).

Por tanto, las propiedades magnéticas (alta anisotropía con Dy/Tb, utilidad de Nd/Sm en imanes) y las ópticas (fósforos Eu/Tb, láseres Er/Yb) están directamente vinculadas a la electrónica 4f y a su débil interacción con el entorno. Geoquímicamente, la separación LREE/HREE a nivel de depósito condiciona la ruta de procesamiento: preconcentración física y cracking para fosfatos/carbonatos; percolación salina e IX para arcillas iónicas; y extracción por solventes (D2EHPA/PC-88A) o resinas quelantes para fraccionar LREE/HREE. Estas bases sustentan las cadenas de valor de imanes permanentes, fósforos y catalizadores (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013; USGS, 2024).

2.2 Clasificación de REE

La clasificación más usada divide los REE según el radio iónico decreciente a lo largo de la serie (contracción lantánida) y su química de coordinación asociada. De forma estándar, se distinguen los LREE (light), los HREE (heavy) y, en algunos trabajos, un subgrupo intermedio (MREE). Esta taxonomía refleja diferencias en afinidad por ligandos oxigenados, patrones de partición, y hospedaje mineral (Shannon, 1976; Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens, Cheng & Waters, 2013). Como se presentan en la Tabla 4.

2.2.1 Tierras Raras Ligeras (LREE)

Comprenden desde el lantano (La) hasta el samario (Sm), con números atómicos entre 57 y 64. Se caracterizan por tener radios iónicos relativamente mayores y menor energía de enlace, lo que facilita su sustitución en minerales comunes (Tabla 1). Generalmente se encuentran en menas como monacita y bastnasita. Su abundancia relativa es mayor que la de las tierras raras pesadas.

2.2.2 Tierras Raras Pesadas (HREE)

Incluyen desde el gadolinio (Gd) hasta el lutecio (Lu), además del itrio (Y), con números atómicos entre 65 y 71, a excepción del Itrio (39), que por su afinidad fisicoquímica es incluido en este grupo. Estos elementos tienen radios iónicos menores y se incorporan con preferencia en estructuras cristalinas compactas, como las de la xenotima y arcillas iónicas. Su concentración en la corteza terrestre es menor, lo que los convierte en más escasos y valiosos.

Tabla 4. Tabla comparativa de las características principales de la clasificación de REE.

Grupo	Elementos	Características
LREE	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu*	Radio mayor; predominan en monacita y bastnasita; Ce y Eu presentan cambios de valencia.

HREE	Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y	Radio menor; afinidad por xenotima y arcillas de adsorción iónica.
------	-----------------------------------	--

2.3 Geoquímica y Mineralogía

Los elementos de tierras raras (REE) constituyen un grupo de elementos fuertemente litófilos, cuya geoquímica está dominada por su afinidad hacia fases silicatadas y su tendencia a participar en redes cristalinas mediante sustitución isovalente o heterovalente. En sistemas minerales comunes, los REE suelen ocupar posiciones originalmente de cationes como Ca^{2+} , Y^{3+} y Th^{4+} , aprovechando la compatibilidad en radios iónicos y coordinaciones estructurales, particularmente en fosfatos, silicatos y óxidos (Gajardo et al., 2024).

La corteza continental presenta una concentración promedio cercana a 169 $\mu\text{g/g}$ (0,0169% de la corteza terrestre) de REE totales, lo que permite caracterizarla como un reservorio donde predominan los elementos de tierras raras livianos (LREE) sobre los pesados (HREE). Con base en dicha abundancia, se estima que los LREE (La–Eu) contribuyen aproximadamente 138 $\mu\text{g/g}$, equivalentes al 81,7 %, mientras que los HREE (Gd–Lu + Y) representan alrededor de 31 $\mu\text{g/g}$, correspondientes al 18,3 % del contenido global (USGS, 2002, como se cita en Avilés, 2024).

Esta distribución asimétrica responde a factores geoquímicos fundamentales, tales como la mayor estabilidad de los LREE en fases magmáticas tempranas, su compatibilidad con estructuras cristalinas más comunes y su menor tendencia a fraccionarse durante procesos de diferenciación cortical. En contraste, los HREE suelen concentrarse en minerales menos abundantes y de mayor especificidad estructural, lo que explica su menor proporción relativa en la corteza. Así, la dominancia de los LREE constituye una característica intrínseca de la evolución geoquímica de la corteza continental y condiciona tanto el comportamiento de los REE en sistemas minerales como su potencial económico.

En sistemas magmáticos, la elevada carga de los iones de REE^{3+} limita su incorporación en la estructura cristalina de minerales formadores de roca como feldespatos, anfíboles u olivinos, los cuales suelen presentar estados de valencia de +1 o +2. Esta incompatibilidad provoca que, durante la cristalización de dichos minerales, la mayoría de las tierras raras permanezcan en el fundido residual. Una excepción notable es el europio (Eu), que puede presentar un estado de valencia +2 y, en consecuencia, tiende a incorporarse en la red cristalina de los feldespatos, generando la conocida anomalía negativa de europio en magmas diferenciados (Balaram, 2019; U.S. Geological Survey, 2017).

Este proceso, denominado cristalización fraccionada, al repetirse en sucesivas etapas, concentra progresivamente las tierras raras en el fundido restante, hasta alcanzar condiciones de sobresaturación que favorecen la cristalización de fases minerales ricas en REE. De esta forma, adquieren relevancia minerales accesorios como los fosfatos (monacita: $(\text{REE,Th,Y})\text{PO}_4$; xenotima: YPO_4), los

carbonatos (bastnasita: $\text{REE}(\text{CO}_3)\text{F}$) y silicatos como la allanita ($\text{Ca}(\text{REE})(\text{Al}_2\text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$).

La mineralogía de los depósitos de tierras raras resulta fundamental en la evaluación de su potencial económico, ya que se priorizan minerales cuya descomposición es más sencilla, como la bastnasita, frente a otros de mayor complejidad en su procesamiento, como ciertos fosfatos y silicatos (López, 2017). Los minerales más comunes, menas, que concentran ERRs incluyen:

2.3.1 Monacita

La monacita es un fosfato de tierras raras, rica principalmente en LREE (La, Ce, Nd). Su fórmula química general es $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$, pudiendo contener además praseodimio y torio en menor proporción. Cristaliza en el sistema monoclinico y se presenta habitualmente en granos anhedrales a subhedrales en rocas metamórficas y depósitos de placer (ilustración 1). Su formación se asocia tanto a ambientes ígneos como metamórficos de alto grado, y es común en arenas minerales derivadas de rocas graníticas. La presencia de torio le confiere radioactividad, lo que implica restricciones ambientales y de manejo (Orris & Grauch, 2002).



Ilustración 1. Monacita

Fuente: <https://www.gemrockauctions.com>

2.3.2 Bastnasita

La bastnasita es un fluorocarbonato de tierras raras, cuya fórmula general es $(\text{Ce,La})(\text{CO}_3)\text{F}$. Es la principal mena de LREE en depósitos de carbonatitas y complejos alcalinos. Cristaliza en el sistema hexagonal y aparece asociada con barita, fluorita y calcita (ilustración 2). Se forma en ambientes ígneos alcalinos y carbonatíticos, frecuentemente como mineral accesorio en fenitas y venillas hidrotermales. Es particularmente abundante en depósitos como Mountain Pass (Estados Unidos) y Bayan Obo (China) (Mariano, 1989).



Ilustración 2. Bastnasita

Fuente: <https://rockidentifier.com/es/wiki/Bastnäsita-%28Ce%29.html>

2.3.3 Xenotima

La xenotima es un fosfato de itrio y tierras raras pesadas (HREE). Su fórmula general es YPO_4 , con sustituciones frecuentes por HREE como Dy, Er y Yb. Cristaliza en el sistema tetragonal, isoestructural con el circón (ilustración 3). Se encuentra típicamente en granitos, pegmatitas y en depósitos aluviales como mineral resistente. Su formación se relaciona con la cristalización tardía en ambientes ígneos ácidos y la concentración en placeres debido a su alta densidad y resistencia química (Gupta & Krishnamurthy, 2005).



Ilustración 3. Xenotima

Fuente: <https://rockidentifier.com/es/wiki/Xenotime.html>

2.3.4 Allanita

La allanita es un miembro del grupo de la epidota, de fórmula general $(\text{Ca,Ce,La,Y})_2(\text{Al,Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$. Cristaliza en el sistema monoclinico y puede contener proporciones significativas de LREE, además de torio y uranio (ilustración 4). Se forma en ambientes ígneos graníticos y metamórficos, siendo un portador secundario de tierras raras. La presencia de Th y U puede generar problemas radiológicos, y su concentración en REE rara vez justifica una explotación primaria (Deer, Howie & Zussman, 1992).



Ilustración 4. Allanita

Fuente: <https://rockidentifier.com/es/wiki/Allanite.html>

2.3.5 Loparita

La loparita es un mineral óxido complejo con fórmula general $(\text{Na,Ce,Sr})(\text{Ti,Nb})\text{O}_3$, de composición variable. Cristaliza en el sistema cúbico (estructura perovskita) y es rica en LREE, Nb y Ti (ilustración 5). Se forma en intrusivos alcalinos, particularmente en sienitas nefelínicas, como en la península de Kola (Rusia). Es una fuente secundaria de tierras raras y niobio, y se asocia a procesos magmáticos diferenciados (Khomyakov, 1995).



Ilustración 5. Loparita

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Loparita-%28Ce%29>

2.3.6 Eudialita

La eudialita es un silicato complejo de sodio, calcio y circonio, con fórmula aproximada $\text{Na}_{15}\text{Ca}_6(\text{Fe,Mn})_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O,OH,H}_2\text{O})_3$. Cristaliza en el sistema trigonal y es característico de complejos ígneos peralcalinos (ilustración 6). Se forma en ambientes alcalinos, particularmente en rocas sieníticas y fonolitas. Es portador de LREE y HREE en menor grado, y su importancia radica en la diversidad de metales estratégicos asociados (Gerasimovsky, 1966).



Ilustración 6. Eudialita

Fuente: <https://rockidentifier.com/es/wiki/Eudialyte.html>

2.3.7 Arcillas iónicas

Las arcillas iónicas constituyen depósitos supergénicos formados por la meteorización intensa de granitos y rocas peralcalinas en climas monzónicos. Los REE se encuentran adsorbidos débilmente en minerales arcillosos como caolinita, halloysita e illita, en forma de complejos hidratados (ilustración 7). No poseen una fórmula química fija, ya que representan un modo de ocurrencia más que un mineral específico. Son la principal fuente de HREE a nivel mundial, explotadas extensivamente en el sur de China mediante procesos de lixiviación salina (Borst et al., 2020).



Ilustración 7. Arcillas iónicas.

Fuente: <https://somoaclar.cl/opinion-tierras-raras-a-la-vista-por-juan-pablo-toro/>

La caracterización de las menas de ERR (Tabla 5) es importante para cualquier estrategia de exploración, concentración y recuperación, pues define no solo el potencial geológico de un depósito, sino también su viabilidad económica, tecnológica y ambiental, es decir, un proyecto viable y sostenible. Haciendo posible diseñar un flujo de procesos eficiente, cumplir con las normativas ambientales y asegurar la competitividad del proyecto en un mercado global cada vez más exigente.

Tabla 5. Tabla comparativa de las principales menas de ERR's.

Mineral	Fórmula química	Cristalización	Ambiente de formación	Relevancia en REE
Monacita	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$	Monoclínico	Ígneo y metamórfico, depósitos de placer	Rica en LREE, principal mena; contiene Th (radioactivo)
Bastnasita	$(\text{Ce}, \text{La})(\text{CO}_3)\text{F}$	Hexagonal	Depósitos carbonatíticos y alcalinos	Fuente principal de LREE, explotada en Mountain Pass y Bayan Obo
Xenotima	YPO_4	Tetragonal	Granitos, pegmatitas, depósitos aluviales	Fuente de HREE e itrio; resistente, alta densidad
Allanita	$(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	Monoclínico	Ígneo granítico y metamórfico	Portador secundario de LREE; puede contener Th y U
Loparita	$(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Sr})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$	Cúbico (perovskita)	Intrusivos alcalinos, sienitas nefelínicas	Fuente secundaria de LREE y Nb
Eudialita	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O})_3$	Trigonal	Complejos peralcalinos	Portador secundario de REE y Zr
Arcillas iónicas	REE adsorbidos en caolinita/halloysita	No aplicable (modo de ocurrencia)	Regolito laterítico sobre granitos/peralcalinas	Fuente principal de HREE; explotadas en China mediante lixiviación salina

2.4 Tipos de Depósitos

Las tierras raras (REE) pueden encontrarse en diferentes tipos de ambientes geológicos, incluyendo rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas. No obstante, son estas últimas las que concentran los depósitos más conocidos y con las leyes más elevadas de elementos de tierras raras (ETR). Dentro de este grupo destacan las carbonatitas, que constituyen una de las fuentes primarias más importantes a nivel mundial, junto con los depósitos asociados a complejos ígneos alcalinos (Mariano, 1989; Chakhmouradian & Wall, 2012).

Asimismo, existen depósitos de tierras raras asociados a uranio, donde la co-ocurrencia de minerales fosfatados facilita la concentración de REE; y depósitos vinculados a sistemas IOCG (Iron Oxide Copper Gold), donde la mineralogía accesoria puede enriquecer ciertos lantánidos (Wang et al., 2019). Otro grupo relevante lo constituyen los depósitos de tierras raras hospedadas en regolitos o arcillas meteorizadas, también conocidos como depósitos de adsorción iónica (REE-IAD), que son especialmente significativos en el sur de China y que representan una fuente dominante de tierras raras pesadas (HREE) (Watanabe, 2014; USGS, 2024).

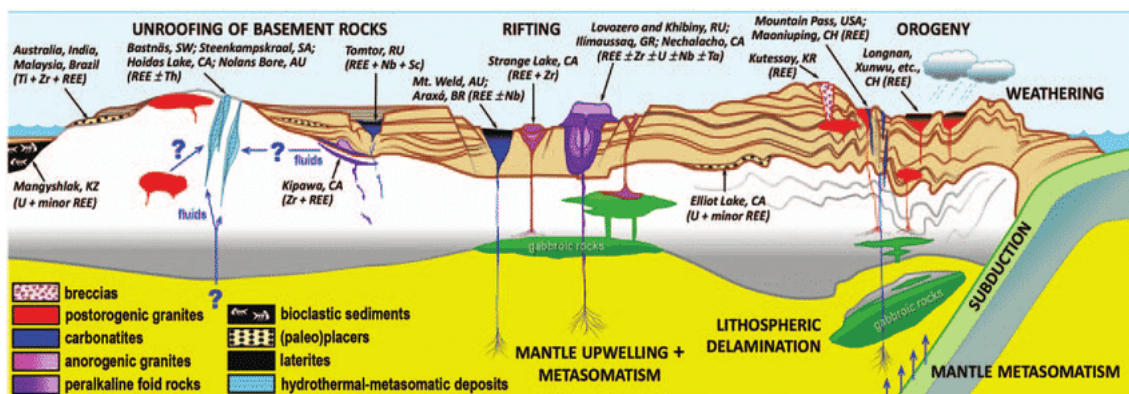


Ilustración 8. Esquema de los tipos de depósitos de ERR's y su contexto tectónico.

Fuente: Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets – Chakhmouradian & Wall. Elements Magazine, Volumen 8, Número 5, Octubre de 2012.



Ilustración 9. Distribución de los depósitos de REE, categorizados por tipos de depósitos y estado de avance del yacimiento.

Fuente: Liu et al, 2023

2.4.1 Depósitos en Carbonatitas

Las carbonatitas constituyen uno de los depósitos más importantes a nivel mundial para las tierras raras, caracterizándose por su origen ígneo en magmas pobres en sílice y ricos en carbonatos. En estos sistemas, las REE se concentran en minerales como la bastnasita y la monacita, principalmente en forma de LREE (Light Rare Earth Elements). Ejemplos destacados incluyen los depósitos de Bayan Obo en China y Mountain Pass en Estados Unidos (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012; USGS, 2022).

2.4.2 Depósitos Asociados a Complejos Ígneos Alcalinos y Peralcalinos

Los complejos ígneos alcalinos y peralcalinos también son fuentes significativas de REE. Estos se forman a partir de magmas diferenciados enriquecidos en sodio y potasio, donde los elementos de tierras raras se concentran en minerales accesorios como apatito, eudialita y loparita. Se caracterizan por una mayor proporción de HREE en comparación con las carbonatitas, lo que los hace

estratégicamente valiosos (Goodenough et al., 2016; Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

2.4.3 Depósitos en Rocas Metamórficas y Sedimentarias

Si bien no constituyen la principal fuente económica de REE, las rocas metamórficas y sedimentarias pueden contener concentraciones relevantes. En estos ambientes, la presencia de REE depende de los minerales del protolito y de los procesos metamórficos y sedimentarios que hayan actuado. Por ejemplo, el enriquecimiento de allanita, xenotima y monacita en esquistos y gneises puede generar ocurrencias significativas (Grauch, 1989; Villela et al., 2016).

2.4.4 Depósitos de Placer

Los depósitos de placer corresponden a acumulaciones secundarias de minerales portadores de REE, como monacita y xenotima, transportados y concentrados por procesos fluviales o marinos. Aunque las leyes pueden ser elevadas, los tonelajes suelen ser limitados, y en muchos casos su explotación está restringida por la presencia de torio y uranio, elementos radiactivos asociados (Mariano, 1989; USGS, 2017).

2.4.5 Depósitos de Arcillas Iónicas (REE-HR)

Los depósitos de arcillas iónicas, también conocidos como REE-HR (Ion-Adsorption Type), son la principal fuente mundial de tierras raras pesadas (HREE). Se forman por procesos de meteorización en climas cálidos y húmedos, donde las REE liberadas de minerales primarios son adsorbidas en arcillas como caolinita, halloysita e illita. China concentra la mayoría de estos depósitos, los cuales se caracterizan por su bajo costo de extracción debido a la facilidad de desorción de los iones mediante soluciones salinas (Li et al., 2017; Sanematsu & Watanabe, 2016). En Chile, este modelo se estudia en la Cordillera de la Costa, destacando el proyecto Aclara en la Región del Biobío (Fock Kunstmann, 2023).

2.4.6 Depósitos Asociados a Uranio e IOCG

En algunos casos, las tierras raras se encuentran asociadas a depósitos de uranio y a sistemas IOCG (Iron Oxide Copper Gold). La mineralogía accesoria de estos depósitos puede incluir monacita y allanita, generando enriquecimientos locales de REE. Si bien su importancia económica es menor en comparación con las carbonatitas y arcillas iónicas, representan una fuente secundaria relevante (Wang et al., 2019).

2.4.7 Fuentes Secundarias: Relaves

Los relaves mineros se han convertido en una fuente secundaria relevante de elementos de tierras raras debido al aumento de demanda global por tecnologías energéticas, como imanes permanentes, vehículos eléctricos y turbinas eólicas (IRENA, 2022; USGS, 2024). La revalorización de estos residuos responde a que muchos relaves almacenan minerales portadores de REE que no fueron recuperados durante operaciones históricas, ya sea por limitaciones tecnológicas o porque su extracción no era económicamente prioritaria (Binnemans et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

La mineralogía hospedante de REE en relaves incluye principalmente: (1) fosfatos (apatito y monacita), (2) silicatos (allanita, titanita), (3) oxihidróxidos de

hierro capaces de adsorber REE y (4) arcillas iónicas con elementos fijados electrostáticamente (Lottermoser, 2010; Castro & Sánchez, 2019). La recuperación de REE depende del grado de liberación de estos minerales, su tamaño característico y la complejidad de su estructura cristalina, especialmente en monacita y allanita (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

El potencial económico de recuperar REE desde relaves depende de la ley residual (ppm TREE), el volumen disponible, la mineralogía, la recuperabilidad metalúrgica y el precio internacional de los óxidos (IRENA, 2022; Market Review, 2024).

La recuperación de lantánidos desde depósitos de relaves mineros presenta múltiples desafío, tales como el encapsulamiento, heterogeneidad y riesgos asociados a elementos penalizantes que condicionan la eficiencia de los procesos de concentración y beneficio.

La viabilidad global del reprocesamiento de relaves como fuente secundaria de REE ha crecido debido a la concentración de la producción mundial de REE en China, que domina tanto la minería como la refinación (USGS, 2024; IRENA, 2022). Países como Estados Unidos, Australia y Canadá investigan el reprocesamiento de relaves fosfatados, relaves de arenas negras y residuos de pórfidos cupríferos como rutas alternativas de suministro seguro (Market Review, 2024). Tecnologías como lixiviación ácida, flotación de fosfatos y separación magnética han mostrado resultados promisorios (Zhang & Edwards, 2012; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Con la presión de la transición energética y la necesidad de nuevos recursos, los relaves se consideran yacimientos secundarios con potencial estratégico, especialmente en países con grandes inventarios de relaves como Chile. La integración de economía circular en el sector minero respalda esta potencial revalorización (Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022).

2.5 Separación de REE

Los REE suelen encontrarse atrapados en fases silicatadas como cuarzo, feldespatos o anfíboles, lo que dificulta su liberación durante la molienda y los procesos de concentración. Esta encapsulación reduce la recuperación metalúrgica, ya que exige condiciones de trituración y lixiviación más agresivas (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013).

En muchas menas secundarias, los lantánidos se encuentran asociados a monacita y xenotima, que contienen torio y uranio. La presencia de estos elementos radiactivos implica mayores costos de manejo, restricciones regulatorias y riesgos ambientales (Habashi, 1997; Chakhmouradian & Wall, 2012).

A continuación, se expone de manera secuencial los procesos necesarios para lograr una separación eficiente y controlada de los elementos de tierras raras, considerando las etapas críticas del proceso, los parámetros operacionales

asociados y las condiciones que garantizan la pureza y selectividad del producto final.

2.5.1 Caracterización Mineralógica

2.5.1.1 Métodos de análisis

Una caracterización mineralógica y química detallada permite comprender la asociación de las fases portadoras de tierras raras, su grado de liberación y las condiciones más adecuadas para su separación, lo que contribuye a reducir significativamente los tiempos de operación, el consumo de reactivos y los costos de procesamiento (Cunningham et al., 2025; Gronen et al., 2019). En consecuencia, esta etapa se considera crítica dentro de la hoja de ruta metalúrgica para el tratamiento y separación de elementos de tierras raras, al constituir la base para el diseño de las rutas de lixiviación, extracción y refinación (Rasool et al., 2025). Para ello, se emplean diversas técnicas analíticas y de caracterización físico-química, entre las que destacan:

- Difracción de rayos X (DRX), para identificar fases cristalinas.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS), para estudiar morfología y asociaciones.
- ICP-MS, para cuantificación elemental precisa.
- Análisis de liberación mineral, que determina la molienda óptima para liberar REEs.

A continuación, se presenta Tabla 6 que resume las técnicas empleadas en los análisis fisicoquímicos de caracterización de tierras raras, comparando el principio de funcionamiento y limitaciones asociadas en el estudio de minerales.

Tabla 6. Técnicas de análisis físico-químicos de caracterización de tierras raras.

Técnica	Principio de funcionamiento	Rango de detección	Limitaciones	Aplicaciones típicas
XRF (Fluorescencia de Rayos X)	Irradiación de rayos X → fluorescencia característica	Óxidos mayores, algunos trazas (>10 ppm)	Baja sensibilidad para elementos ligeros (Na, Mg), requiere calibración	Control de calidad, análisis rutinario de menas y concentrados
ICP-OES / ICP-MS	Ionización en plasma acoplado inductivo, detección óptica o de masas	Elementos traza hasta ppb	Digestión ácida previa, interferencias espectrales, equipos costosos	Caracterización de REE, metales críticos (Co, Ni, Cu, etc.)
SEM-EDS / WDS	Haz de electrones genera emisión de electrones secundarios y rayos X característicos	Micron a submicron, análisis semicuantitativo	Preparación de muestras, no representatividad a gran escala	Identificación de fases minerales, texturas, asociaciones de REE y Co

XRD (Difracción de Rayos X)	Interferencia constructiva de rayos X en redes cristalinas	Fases cristalinas >2% en volumen	No detecta fases amorfas, limitada en fases de baja concentración	Identificación de minerales principales y secundarios
CPT-XRF	Penetración de cono + fluorescencia de rayos X in situ	Elementos pesados (Cu, Fe, As, Pb, Zn)	Menor precisión que laboratorio, dificultades en terrenos heterogéneos	Modelos 3D de distribución geoquímica, exploración rápida

2.5.1.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica no destructiva utilizada para determinar concentraciones de óxidos mayores y algunos elementos traza. Consiste en irradiar una muestra con rayos X y medir la energía característica emitida por los elementos presentes. Es ampliamente empleada en minería por su rapidez (análisis en minutos) y bajo costo relativo por muestra (~10–30 USD). Entre sus limitaciones destacan la menor sensibilidad para elementos ligeros (ej. Na, Mg) y la necesidad de calibraciones frecuentes.

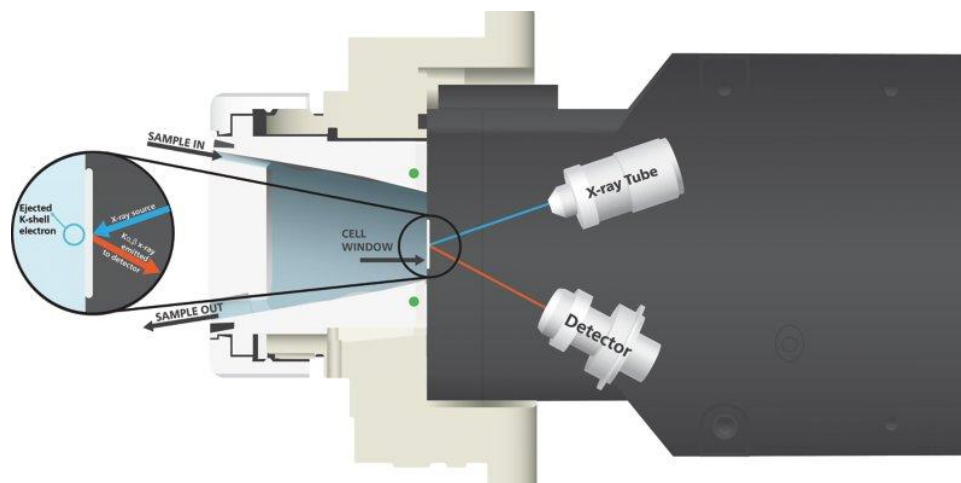


Ilustración 10. Fluorescencia de Rayos X (XRF)

Fuente: https://www.metrohm.com/es_es/discover/blog/2025/x-ray-fluorescence.html

2.5.1.3 Plasma Acoplado Inductivamente (ICP)

La espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) o de masas (ICP-MS) permite la cuantificación precisa de elementos traza a niveles de ppb. La técnica requiere digestión ácida previa de las muestras, lo que implica un mayor costo (~50–150 USD por muestra) y tiempo de preparación. Es fundamental para caracterizar tierras raras, cobalto y metales críticos presentes en bajas concentraciones. Entre sus limitaciones se incluyen la interferencia espectral y la necesidad de laboratorios especializados.

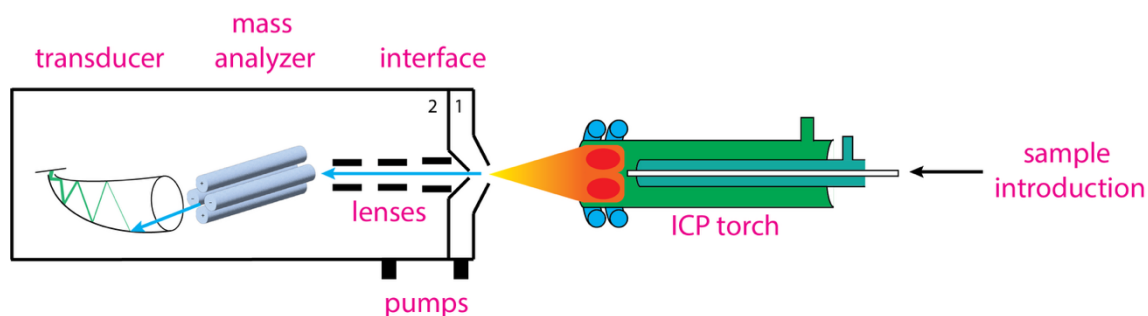


Ilustración 11. Plasma Acoplado Inductivamente (ICP)

Fuente: https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Química_Analítica/Análisis_Instrumental

2.5.1. 4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El SEM permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de minerales y analizar su composición elemental mediante detectores EDS o WDS. Es especialmente útil para identificar fases portadoras de elementos estratégicos como ETR y Co, además de determinar tamaños y texturas de grano. Su costo es elevado (aprox. 100–200 USD por hora de uso de equipo) y requiere preparación detallada de muestras. Sin embargo, su capacidad para observar morfología y asociación mineralógica lo convierte en una técnica esencial.

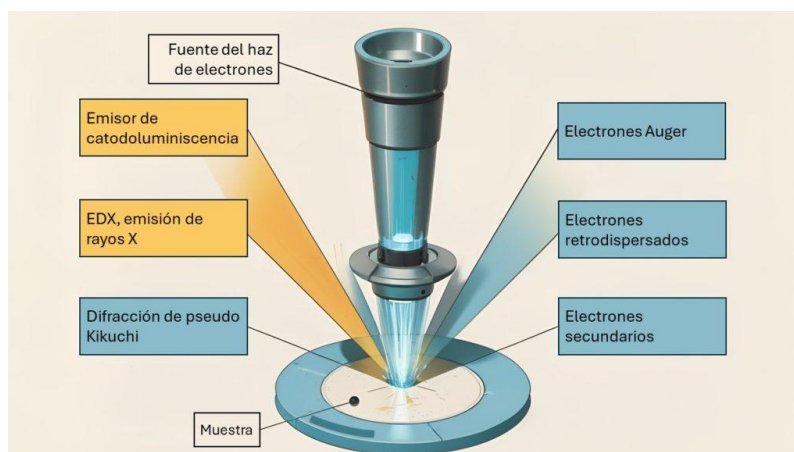


Ilustración 12. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Fuente: https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Química_Analítica/Análisis_Instrumental

2.5.1.5 Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de rayos X permite identificar fases cristalinas presentes en un material, comparando patrones de difracción con bases de datos internacionales. Se utiliza ampliamente en caracterización mineralógica para confirmar presencia de minerales como monacita, bastnasita o arcillas. Los costos varían entre 40 y 100 USD por muestra. Su limitación principal es la dificultad para detectar fases amorfas y minerales en baja concentración (<2%).

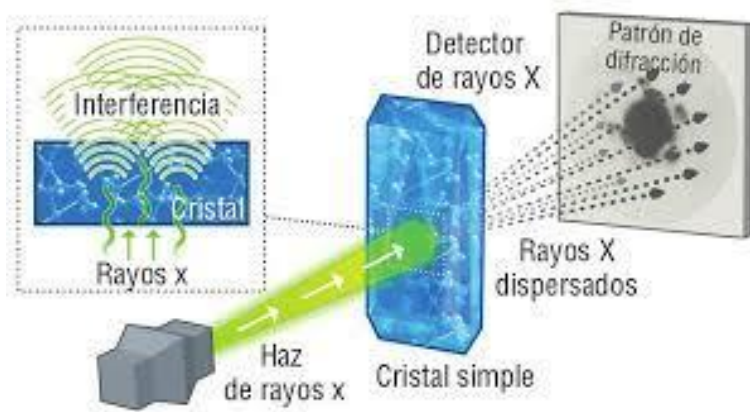


Ilustración 13. Difracción de Rayos X (XRD)

Fuente: https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Quimica_Analitica/Análisis_Instrumental

2.5.1.6 Método CPT–XRF (Cone Penetration Test con XRF)

El CPT–XRF combina la penetración de cono (cone penetration test) con análisis de fluorescencia de rayos X in situ, permitiendo obtener datos en profundidad de elementos como Cu, Fe, As, Pb y Zn sin necesidad de extracción de testigos. Esta técnica innovadora permite la generación de modelos 3D de distribución elemental, optimizando exploración y gestión ambiental. Aunque reduce costos de muestreo extensivo, sus limitaciones incluyen menor precisión que los análisis de laboratorio y dificultades en su uso en terrenos muy heterogéneos.

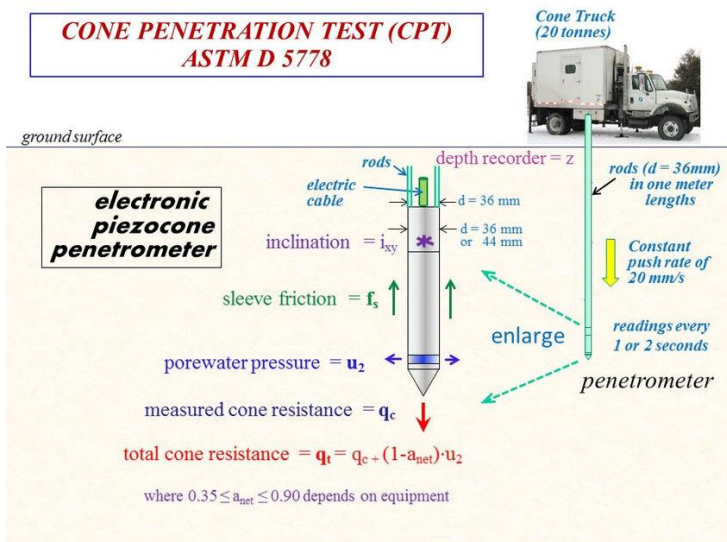


Ilustración 14. Método CPT–XRF (Cone Penetration Test con XRF)

Fuente: https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Quimica_Analitica/Análisis_Instrumental

Cada técnica de análisis mineralógico cumple un rol específico (tabla X), XRF permite análisis rápidos de óxidos mayores; ICP ofrece la mayor precisión para elementos traza; SEM brinda información morfológica y de microescala; XRD confirma fases cristalinas; y el CPT–XRF abre la puerta a aplicaciones in situ con modelación tridimensional.

A continuación, se presenta una tabla comparativa (Tabla 7) que sintetiza las principales técnicas de análisis descritas previamente, incluyendo los costos

asociados a su ejecución y los tipos de resultados o información que proporcionan, con el objetivo de facilitar la evaluación de su aplicabilidad en distintos contextos de caracterización mineral y fisicoquímica.

Tabla 7. Comparativa de técnicas de análisis físico-químicas y los costos asociados.

Técnica	Resultados	Formato de cobro	Rango/ejemplo de costo (USD)
XRD (difracción de rayos X)	Fases cristalinas; semicuant. a cuant.	Por muestra	≈ US\$50 (XRD básica) a ≈ US\$330 (bulk+clays c/interpretación)
SEM-EDS	Imágenes + química puntual/áreas	Por hora (con/sin operador)	≈ US\$120/h (laboratorio público, sin operador) + preparación
EPMA (microsonda)	Química puntual de alta precisión	Por hora	Solicitar cotización (varía por laboratorio)
Mineralogía automatizada (QEMSCAN/TIMA)	Modal, asociación, liberación, tamaño	Por muestra / por fracciones	≈ US\$1.500 por muestra (modal, hasta 5 fracciones)
ICP-MS / LA-ICP-MS (REE)	Concentraciones totales / mapeo láser	Por muestra / por hora	Solicitar cotización (depende de matriz, preparación y método)
Preparación de muestra (pulidos, montajes)	Bloques pulidos para SEM/EPMA/QEMSCAN	Por espécimen	≈ US\$100 por montaje pulido

Además de los costos directos asociados a los análisis minerales y geoquímicos, es fundamental considerar los gastos complementarios derivados de la preparación de muestras, el aseguramiento de calidad (QA/QC), los tiempos de interpretación especializada y los procesos logísticos de envío, los cuales constituyen una parte significativa del presupuesto total de un programa de caracterización (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022).

La preparación de muestras incluye etapas como secado, chancado, pulverización, cuarteo, homogeneización, tamizado y, cuando corresponde, montaje mineralógico o resinado para microscopía. Estas operaciones son esenciales para garantizar la representatividad y reproducibilidad de los resultados analíticos, ya que cualquier sesgo en la preparación puede introducir errores significativos en la estimación de leyes, asociaciones mineralógicas o

parámetros geoquímicos (Herrera, 2017; González, 2022; Castro & Sánchez, 2019).

En paralelo, las actividades de QA/QC forman parte obligatoria de cualquier campaña analítica robusta. Estas incluyen la incorporación sistemática de duplicados, estándares certificados, blancos analíticos y controles de precisión, además de auditorías internas y externas a los laboratorios participantes (Jordens et al., 2013; MinMinería, 2022). La implementación de estos controles implica costos adicionales, tanto por la adquisición de materiales certificados como por el tiempo adicional de procesamiento y reporte requerido en los laboratorios especializados (Binnemans et al., 2013).

Asimismo, la interpretación y validación de los resultados analíticos exige la participación de especialistas en mineralogía, petrografía, geoquímica aplicada o geometalurgia, quienes deben evaluar consistencia interna, comportamientos anómalos y coherencia con la mineralogía esperada del depósito. Estos procesos pueden extender los plazos de entrega y generar costos adicionales asociados a consultoría técnica o revisiones especializadas (IRENA, 2022; Market Review, 2024).

Finalmente, la logística de envío de muestras—tanto a laboratorios nacionales como internacionales—incluye costos de embalaje, seguros, exportación temporal, certificación y cumplimiento de normativas específicas para transporte de materiales geológicos. En el caso de muestras enviadas al extranjero, deben considerarse los tiempos de aduana, restricciones de trazabilidad y costos de correspondencia internacional (USGS, 2024; Cochilco, 2021).

2.5.2 Concentración Física

La primera etapa consiste en la reducción de tamaño para liberar las fases portadoras de REE (monacita, bastnasita, xenotima, allanita). Se utilizan trituradoras de mandíbula y molinos de bolas o molinos planetarios. La liberación se evalúa mediante microscopía electrónica (SEM-EDS) y mineralogía automatizada (QEMSCAN/MLA), determinando el tamaño óptimo de molienda (Wills & Finch, 2016).

Los procesos de preconcentración permiten incrementar la ley de los REE reduciendo la masa alimentada a lixiviación. Las técnicas más empleadas incluyen:

2.5.2.1 Separación Gravimétrica

Este método aprovecha las diferencias de densidad entre los minerales de tierras raras. En menas de REE, monacita/xenotima ($\rho \approx 4.9\text{--}5.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y allanita/bastnasita ($\rho \approx 3.9\text{--}4.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pueden concentrarse frente a cuarzo/feldespatos ($\rho \approx 2.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Wills & Finch, 2016).

Se utilizan equipos como mesas concentradoras y espirales. El rango de partícula óptimo suele estar entre 100 y 2000 μm . Su ventaja radica en ser un método de bajo costo y consumo energético, aunque su eficiencia disminuye con partículas muy finas. Su principal aplicaciónes en la preconcentración de pesados (monacita/xenotima) en arenas; etapa anterior a WHIMS (Wills & Finch, 2016).

2.5.2.2 Separación Magnética

Muchos minerales de tierras raras presentan un comportamiento paramagnético que permite su recuperación mediante separadores magnéticos. Existen dos variantes principales: LIMS (Low-Intensity Magnetic Separation) para remover minerales fuertemente magnéticos como magnetita, e ilmenita; y WHIMS (Wet High-Intensity Magnetic Separation), que utiliza altos campos magnéticos (0.8–2 T) para concentrar minerales débilmente paramagnéticos como monacita, xenotima y bastnasita; cuarzo/feldespato son diamagnéticos. Matrices ferromagnéticas incrementan el gradiente de campo para capturar partículas débilmente paramagnéticas (Svoboda, 2004).

a. LIMS (Low-Intensity Magnetic Separation)

- Campo típico: 0.1–0.2 T (1,000–2,000 G) en húmedo; diseñado para magnetita y minerales fuertemente magnéticos.
- Tamaño de partícula: hasta ~6–10 mm en seco; en húmedo usualmente <1 mm.
- Uso en REE: como etapa de limpieza para remover magnetita/ilmenita antes de WHIMS (Wills & Finch, 2016).

b. WHIMS (Wet High-Intensity Magnetic Separation)

- Campo típico: 0.8–2.0 T (hasta ~3 T); medio húmedo con matriz (acero inoxidable/'expanded metal') para alto gradiente.
- Tamaño de partícula: óptimo 45–500 μm ; alimentación clasificada para minimizar 'slimes'. % sólidos 10–40%.
- Especificaciones: ciclos de imantación–desimantación; lavado de matriz para liberar concentrado paramagnético.
- Aplicación: recuperación de monacita/xenotima/bastnasita débilmente paramagnéticas desde arenas y relaves (Svoboda, 2004; Wills & Finch, 2016).

2.5.2.3 Ciclones Finos

El ciclón hidráulico o hidrociclón opera mediante la introducción tangencial de una suspensión acuosa en su parte superior, lo que genera un campo de fuerzas centrífugas que separa las partículas en dos corrientes: la fracción gruesa (underflow) y la fracción fina (overflow). La eficiencia de separación depende de variables como la presión de alimentación, el diámetro del ciclón, la concentración de sólidos en la pulpa y la viscosidad del fluido. Para materiales arcillosos y menas finas de REE, los ciclones se calibran para obtener un punto de corte (d_{50}) entre 10 y 40 μm , permitiendo concentrar las fases con mayor contenido de elementos de tierras raras adsorbidos o presentes en minerales secundarios.

En depósitos de arcillas iónicas, particularmente en los de tipo laterítico o sedimentario, los elementos de tierras raras se encuentran adsorbidos en las superficies de minerales de caolinita, illita o esmectita. La clasificación por ciclones permite separar las fracciones arcillosas más finas (<20 μm), que concentran la mayor parte del contenido de REE. Posteriormente, estas fracciones se someten a lixiviación salina (por ejemplo, con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o NaCl) para la recuperación de los elementos adsorbidos. Este proceso ha demostrado

mejorar el rendimiento metalúrgico, reduciendo el consumo de reactivos en etapas posteriores (Cunningham et al., 2025; Zhang et al., 2020).

La presente tabla (Tabla 8) resume los principales métodos de concentración física aplicados a minerales de REE, considerando los equipos utilizados, costos de activos, limitaciones operativas, aplicaciones según el tipo de mena, tamaños de partícula (F80/P80), consumo energético y ventajas técnicas.

Tabla 8. Métodos de concentración física para minerales de REE.

Método de concentración física	Equipo	Costos estimados de activos ¹	Tipo de mena	Tamaño de partícula (P80 / F80) ²	Consumo energético ³	Ventajas
Trituración y molienda (conminución)	Chancadora giratoria, molino de bolas/autógeno	Altos (molino ≈ US\$2–10 M según capacidad)	Bastnasita, carbonatitas, monacita	P80 ≈ 75–150 μm	Elevado (molienda fina)	Permite liberación de minerales portadores de REE para etapas posteriores
Separación gravimétrica	Espirales, mesas de concentración, ciclones	Moderados (≈ US\$0,1–0,5 M)	Monacita, xenotima (arenas minerales)	F80 < 150–300 μm	Bajo-moderado	Buena recuperación inicial para menas simples (placer) (Moghise et al., 2016)
Separación magnética	Separadores de alta intensidad, imanes	Medio-alto (≈ US\$0,5–3 M)	Bastnasita (Fe asociada), menas IOCG	P80 ≈ 100 μm	Moderado-alto	Elimina ganga magnética antes de lixiviación (Nzeh et al., 2023)
Clasificación / ciclones de finos	Ciclones, bombas de lodo, hidrociclones	Bajo-moderado	Arcillas iónicas, menas finas de REE	F80 < 20–50 μm	Bajo-moderado	Permite deportación de finos portadores de REE antes del procesamiento hidrometalúrgico (Cunningham et al., 2025)

2.5.3 Flotación

La flotación de minerales de tierras raras constituye una de las etapas fundamentales en el procesamiento físico de menas fosfatadas y carbonatadas como la monacita, bastnasita y xenotima. Este proceso permite concentrar los minerales portadores antes de su tratamiento hidrometalúrgico, aprovechando diferencias en la humectabilidad de las superficies minerales mediante el uso de reactivos químicos específicos (Jordens, Cheng & Waters, 2013; Fuerstenau & Han, 2003).

La flotación de minerales de REE es uno de los métodos más empleados debido a la baja ley de muchos depósitos. Se basa en la modificación de la superficie de minerales de REE (principalmente fosfatos como monacita y carbonatos como bastnasita) para hacerlos hidrofóbicos mediante reactivos colectores (hidroxamatos, ácidos grasos). En el caso de los minerales como la bastnasita $(\text{Ce,La})(\text{CO}_3)\text{F}$ y la monacita $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$ presentan cargas superficiales que varían con el pH, lo que influye directamente en su interacción con los colectores. La superficie de la bastnasita presenta puntos de carga cero entre pH 5 y 6, mientras que la monacita entre pH 3 y 4, determinando su flotabilidad selectiva (Pradip & Fuerstenau, 1991; Filippov et al., 2019).

Los tamaños de partícula ideales oscilan entre 20 y 150 μm . Su ventaja principal es la selectividad, aunque depende fuertemente de la química de la pulpa y requiere un control preciso de pH y reactivos (Pradip & Fuerstenau, 1983; Filippov et al., 2014).

En la flotación de REE, se utilizan principalmente:

- Celdas mecánicas (Denver, Wemco): permiten una agitación intensa y control del aire.
- Columnas de flotación: favorecen la selectividad y recuperación en concentrados limpios.
- Reactor de acondicionamiento: promueve la adsorción de colectores antes de la etapa de flotación primaria (Filippov et al., 2019; Jordens et al., 2013).

Los principales factores que determinan la eficiencia del proceso de flotación incluyen el tamaño de partícula, la dosificación de colectores y el control del pH. Los minerales de ganga (cuarzo, calcita, barita) pueden interferir con la adsorción selectiva, reduciendo la recuperación de REE. La utilización de agentes depresores, como el silicato de sodio, ayuda a minimizar estas interferencias (Jordens et al., 2013; Filippov et al., 2019).

La flotación es esencial en depósitos primarios de carbonatitas (como Bayan Obo en China y Mountain Pass en EE. UU.) para la concentración de bastnasita, logrando concentrados de 60–70% de TREO. Sin embargo, las menas complejas o finamente diseminadas requieren tecnologías híbridas que integren flotación y separación magnética antes de la lixiviación (Jordens et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Reactivos

Los reactivos empleados en la flotación de tierras raras se agrupan en colectores, depresores, modificadores de pH y espumantes. Los colectores de tipo hidroxamato (p. ej. ácido octilhidroxámico) son ampliamente utilizados para minerales fosfatados y carbonatados, ya que forman complejos estables con cationes de REE en la superficie (Jordens et al., 2013; Filippov et al., 2019).

Los principales reactivos para la flotación de tierras raras se incluyen en la siguiente tabla (Tabla 9):

Tabla 9. Principales reactivos para flotación de minerales de REE.

Tipo de Reactivo	Ejemplos Comunes	Función Principal
Colectores	Ácidos hidroxámicos, oleato de sodio, carboxilatos, fosfatos	Hidrofobización selectiva del mineral útil
Depresores	Silicato de sodio, CMC, ácido tánico	Evitan la flotación de ganga (cuarzo, barita, calcita)
Modificadores de pH	NaOH, H ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , CaO	Ajustan potencial superficial y adsorción del colector
Espumantes	MIBC, Aceite de pino, DowFroth	Estabilizan espuma y controlan tamaño de burbuja
Activadores	Pb ²⁺ , Ba ²⁺ , Fe ³⁺ , Al ³⁺	Aumentan la adsorción de colectores en superficies minerales poco reactivas

Los principales reactivos por mineral incluyen:

- **Bastnasita:** La bastnasita, típica de carbonatitas como Bayan Obo (China) o Mountain Pass (EE. UU.), se beneficia mediante flotación alcalina con colectores Octilhidroxámico (OHA) y oleatos, modificador de pH (Na₂CO₃) para mantener ambiente alcalino (pH 9–9.5) y depresor de Silicato de Sodio. El circuito habitual incluye etapas rougher-cleaner y ocasionalmente scavenger (Jordens et al., 2013).
- **Monacita:** Control estricto de pH entre 7–9. Se utilizan colectores hidroxámicos y carboxílicos, con CMC o ácido tánico como depresores. El circuito típico es rougher + 2 cleaners (Filippov et al., 2022; Haque et al., 2023).
- **Xenotima:** Colectores de fosfato y oxamato a pH 8–10, con depresores de sílice (vidrio soluble, silicato de sodio). El circuito rougher-cleaner con columnas produce concentrados de alta pureza (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).
- **Allanita y eudialita:** Estos silicatos y niobatos complejos se preconcentran por WHIMS antes de la flotación. Usan ácidos grasos y sulfonatos con ajuste pH 8–9.5 con limpieza múltiple. (Filippov et al., 2022; Haque et al., 2023).
- **Arcillas iónicas (IAD):** Normalmente no se flotan; se tratan por lixiviación directa (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Filippov et al., 2019; Jordens et al., 2013).

2.5.4 Lixiviación

La lixiviación es la etapa clave para disolver los REE desde la matriz mineral. Se emplean medios ácidos (H₂SO₄, HCl) y carbonatados, según el tipo de mineral. Parámetros críticos: relación sólido-líquido, temperatura, pH/Eh, tiempo y granulometría. Los estudios experimentales utilizan diseños factoriales para evaluar la extracción de Nd, Pr y Dy (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

La obtención de tierras raras (REE) depende en gran medida de la mena procesada. Las menas más relevantes son: bastnasita (fluorocarbonato),

monacita (ortofosfato) y arcillas adsorbidas de iones (depósitos lateríticos). Cada una presenta diferencias en mineralogía, procesos de lixiviación, recuperación, subproductos y desafíos ambientales.

2.5.4.1 Rutas de lixiviación

La siguiente tabla (Tabla 10) resume las principales rutas de lixiviación aplicadas a diferentes tipos de menas de tierras raras, destacando para cada caso la reacción química clave y las condiciones operacionales críticas (temperatura, concentración de reactivos, tiempo de residencia). Este esquema permite comparar de manera sistemática las diferencias entre cada ruta, facilitando el análisis de eficiencia, consumo de reactivos y potenciales impactos ambientales.

Tabla 10. Ruta de lixiviación según minerales mena de REE.

Mena	Método principal	Condiciones	Reacciones clave
Bastnasita	Conversión alcalina o tostación con H_2SO_4	$NaOH$ 70–95 °C; H_2SO_4 400–500 °C	$REE(CO_3)F \rightarrow RE(OH)_3 / RE(SO_4)$
Monacita	Digestión alcalina o ácida	$NaOH$ 140–150 °C; H_2SO_4 200–250 °C	$REEPO_4 \rightarrow RE(OH)_3 / RE(SO_4)$
Arcillas adsorbidas	Intercambio iónico con sales	Soluciones $(NH_4)_2SO_4/NaCl$, T ambiente	$Clay-REE^{3+} + NH_4^+ \rightarrow Clay-NH_4 + REE^{3+}$

• Monacita/Xenotima (fosfatos)

Requieren una etapa de “cracking” para romper el retículo fosfato previo a la lixiviación. Se emplean dos rutas industriales principales:

- ‘acid bake’ con H_2SO_4 concentrado (200–250 °C) seguido de lixiviación acuosa
- digestión cáustica con $NaOH$ concentrado (140–160 °C) para formar hidróxidos/óxidos de REE y solubilizar el fosfato como Na_3PO_4 . Ambas rutas facilitan recuperaciones elevadas de REE (>85–95%) con co-gestión de Th/U (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Habashi, 1997).

• Bastnasita (carbonato-fluoruro)

Puede calcinarse (500–800 °C) para eliminar CO_2/F^- y activar la superficie; luego se lixivia en medios cloruro (HCl) o sulfato (H_2SO_4) con altas recuperaciones (80–95%), ajustadas por pH/Eh y complejación de impurezas (Jordens et al., 2013).

• Arcillas de adsorción iónica (REE-IAD)

los REE están adsorbidos en sitios de intercambio; se recuperan por percolación o agitación con soluciones salinas (p. ej., $(NH_4)_2SO_4$, $MgSO_4$, $NaCl$) a pH ligeramente ácido (4–6), generalmente a temperatura ambiente, con recuperaciones reportadas de 50–90% según mineralogía y régimen de lavado (Sanematsu & Watanabe, 2016).

2.5.5 Purificación y Separación

La purificación y separación de los elementos de tierras raras (REE) constituye una de las etapas más complejas del procesamiento hidrometalúrgico debido a su similitud química y a los pequeños radios iónicos entre los lantánidos. Para lograr su separación selectiva, se utilizan procesos fisicoquímicos avanzados

como la extracción con solventes (SX) y el intercambio iónico (IX), que permiten diferenciar los lantánidos ligeros (LREE) de los pesados (HREE) con alta pureza (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).

Dada la similitud química entre los REE, su separación requiere procesos especializados:

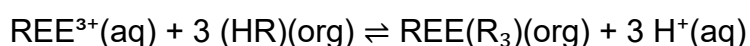
- i. Extracción con solventes (SX) usando organofosfatos (D2EHPA, PC-88A) para diferenciar LREE y HREE.
- ii. Intercambio iónico (IX) con resinas específicas.
- iii. Precipitación selectiva como oxalatos o carbonatos, seguida de calcinación a óxidos de alta pureza (REO).

Los procesos SX e IX son complementarios y se seleccionan según la composición de la mena y el tipo de REE. El SX ofrece una alta capacidad de fraccionamiento entre LREE y HREE, mientras que el IX proporciona mayor selectividad para REE específicos, especialmente en sistemas de baja concentración. La combinación de ambos métodos representa la estrategia más efectiva para obtener concentrados de alta pureza (> 99.9 %) en aplicaciones industriales modernas (Kim et al., 2023; Zhang et al., 2021).

2.5.5.1 Extracción por solventes (SX) con organofosforados

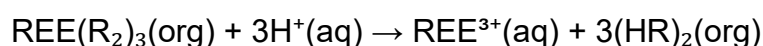
La SX separa REE entre una fase acuosa (alimentación) y una fase orgánica (extractante en diluyente), con etapas de extracción, lavado (scrubbing) y re-extracción (stripping) dispuestas en contracorriente. Los extractantes ácidos organofosforados más usados son: D2EHPA (P204) y PC-88A (P507). La fortaleza de extracción crece con el número atómico, por lo que los HREE se extraen a pH más bajos que los LREE, habilitando su fraccionamiento en baterías de etapas (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Xie, Zhang, Dreisinger, & Doyle, 2014).

Reacción general con extractantes ácidos (ej. D2EHPA, PC-88A):



donde HR es el extractante ácido y (org) indica fase orgánica.

Reacción de reextracción (stripping):



El stripping se realiza con soluciones de HCl o HNO₃ diluidos (0.1–1 M).

Los extractantes comunmente utilizados son Ácidos fosfóricos(D2EHPA: ácido di-2-etilhexilfosfórico y PC-88A: ácido 2-etilhexilfosfónico mono-2-etilhexil éster), Aminas terciarias y cuaternarias (Alamine 336) para aniones de REE, Extractantes neutros (fosfinas oxidas: Cyanex 923). Y diluyentes communes, tales como, queroseno, nafta, hidrocarburos alifáticos.

Principalmente se deben controlar los parámetros de operación del proceso como la relación O/A típicamente 1:1 a 2:1, remover impurezas (Fe, Al, U, Th) implementando scrubbing.

Parámetros y prácticas de diseño:

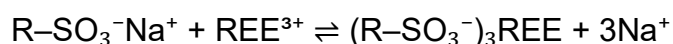
- Medio: sulfato, cloruro o nitrato; el cloruro/nitrato facilitan stripping selectivo.
- pH de equilibrio: típico 1.5–4.0 (dependiente del extractante y salinidad). HREE → pH más bajo (~2–3); LREE → pH más alto (pH 4–5).
- Saponificación: pre-neutralizar 10–30% del extractante con NaOH/ammónia para estabilizar el pH y reducir co-extracción de impurezas.
- Relación orgánico/acuoso (O/A): 1:1 a 2:1; tiempos de mezcla 1–3 min; separación de fases en decantadores 1–5 min.
- Factores de separación (α): entre REE adyacentes suelen ser 1.5–5, requiriendo muchas etapas (diseño McCabe–Thiele).
- Lavado (scrub): ácido débil o salino para remover arrastres; Stripping: HCl/HNO₃ 2–6 M o complejantes.
- Particularidades: Ce(III) puede separarse oxidándolo a Ce(IV) (no extraíble/precipitable); Eu(III) por reducción a Eu(II).

Los sistemas industriales SX operan en circuitos de múltiples etapas con módulos de extracción, lavado (scrubbing) y reextracción (stripping). Las configuraciones más comunes son de tipo mezclador–decantador (mixer-settler) y sistemas pulsados en columnas. Un circuito típico para REE involucra 10–20 etapas consecutivas para lograr fraccionamientos entre LREE y HREE (Jordens et al., 2013).

2.5.5.2 Intercambio iónico (IX) con resinas específicas

El intercambio iónico se basa en la adsorción selectiva de iones REE³⁺ sobre resinas poliméricas funcionalizadas con grupos fosfónicos, amínicos o carboxílicos. El proceso ocurre a través del reemplazo de un ion móvil en la resina por un ion REE presente en la solución lixiviada (Zhang et al., 2021).

Reacción general:



donde R–SO₃[–] representa el grupo funcional sulfonato de la resina.

Se utiliza comunmente resina de intercambio catiónico fuerte sulfónicas (Dowex 50WX8) o carboxílica (Amberlite IRC-748) para captura masiva y, preferentemente, resinas quelantes aminofosfónica (Purolite S940) para selectividad HREE/LREE, a una temperatura de 25–40 °C. La operación típica es en columna, con etapas de carga, lavado y elución, generando elución fraccionada (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Tanaka, Oki, Koyama, Narita, & Oishi, 2013).

Parámetros y prácticas:

- pH de carga: 1–3 (control de hidrólisis de Fe/Al); fuerza iónica moderada (NaCl/NaNO₃) para estabilizar la selectividad.

- Elución: gradientes de pH/ionicidad o eluentes complejantes (EDTA, citrato, lactato, tiocianato) para resolver fracciones.
- Capacidad efectiva: $0.5\text{--}2.5 \text{ eq}\cdot\text{L}^{-1}$ (según resina y matriz); velocidades $1\text{--}5 \text{ BV}\cdot\text{h}^{-1}$ (bed volumes por hora).
- Breakthrough y curvas de elución permiten balancear pureza vs. recuperación.
- En arcillas de adsorción iónica, el IX se acopla a lixiviados amónicos para concentrar HREE (Sanematsu & Watanabe, 2016).

2.5.5.3 Precipitación selectiva y calcinación a REO

La precipitación selectiva representa la etapa final del proceso hidrometalúrgico de purificación de los elementos de tierras raras. Este procedimiento permite separar los REE disueltos del licor ácido resultante de la lixiviación o extracción mediante la formación de compuestos poco solubles como oxalatos ($\text{RE}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$), carbonatos o hidróxidos ($\text{RE}_2(\text{CO}_3)_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$), los cuales posteriormente son calcinados para obtener óxidos de tierras raras (REO) de alta pureza, RE_2O_3 (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Zhang et al., 2021).

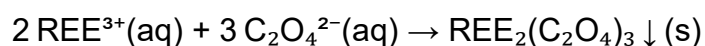
Secuencias típicas:

i. Remoción de Th/Fe/Al:

por hidrólisis controlada (Th(IV) precipita a pH 1–2; Fe(III) a pH 3–4; Al(III) a pH 4–5).

ii. Precipitación de REE como oxalatos

Con $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (pH 1–2, 25–60 °C) es uno de los métodos más utilizados debido a la alta selectividad y pureza del producto obtenido. La reacción general para la formación del oxalato de REE se expresa como:



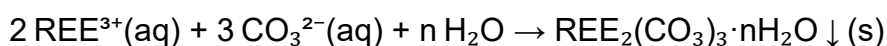
Los precipitados de oxalato son de color blanco o crema y presentan una estequiometría estable, lo que facilita su posterior conversión a óxidos mediante calcinación.

Las condiciones óptimas para este proceso incluyen pH 4–6, temperatura entre 70–90 °C, tiempo de reacción de 1–3 horas y agitación constante. El exceso de reactivo (20–30%) asegura la completa precipitación de los REE, mientras que el torio y uranio permanecen mayormente en solución (Kim et al., 2023).

iii. Precipitación de REE como carbonato

El carbonato de sodio (Na_2CO_3) o de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) permite la obtención de REE en forma de carbonatos básicos. Este método es menos selectivo que la precipitación oxálica, pero resulta más económico y rápido (Tang et al., 2020).

Reacción general:



El proceso ocurre a pH 5.5–7.5, con temperaturas moderadas (60–80 °C) y tiempos de residencia entre 0.5–2 horas. La principal ventaja es el menor costo

y la fácil separación pero la posible co-precipitación con impurezas limita el proceso.

iv. Lavado y secado del precipitado

El lavado del precipitado de oxalatos o carbonatos de tierras raras tiene como objetivo eliminar impurezas solubles como iones sulfato, cloruro, sodio o amonio, además de restos de ácidos o bases usados durante la lixiviación. Se realiza mediante enjuagues sucesivos con agua desionizada o soluciones diluidas de ácido nítrico (0.01–0.05 M HNO_3), que disuelven selectivamente las sales solubles sin afectar la estructura del precipitado (Kim et al., 2023).

El secado se lleva a cabo a temperaturas entre 100–120 °C bajo atmósfera inerte o aire seco, durante 12–24 horas. Este proceso elimina la humedad superficial y mejora la estabilidad térmica del compuesto antes de su calcinación o disolución posterior (Tang et al., 2020).

Ce puede oxidarse a CeO_2 ; otros dan Ln_2O_3 .

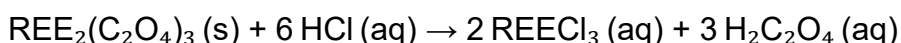
v. Re-precipitación/re-disolución para elevar pureza a 99–99.9%.

La re-precipitación consiste en disolver el precipitado impuro (oxalato o carbonato) en un medio ácido controlado y luego volver a precipitarlo. Este proceso elimina impurezas metálicas como Fe^{3+} , Al^{3+} , Th^{4+} y U^{6+} , obteniendo productos homogéneos y de alta pureza (Zhang et al., 2021).

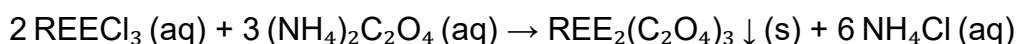
La disolución se realiza en soluciones diluidas de HCl o HNO_3 (0.5–1 M), a 70–90 °C con agitación constante. Posteriormente, la re-precipitación se induce mediante la adición de oxalato de amonio o carbonato de sodio, controlando el pH entre 4.5 y 5.5.

Reacciones químicas principales:

Disolución controlada:

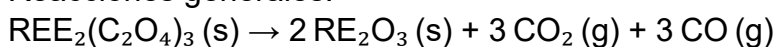


Re-precipitación selectiva:



Los precipitados de oxalato, carbonato o hidróxido se someten a calcinación para eliminar volátiles y formar óxidos estables. La temperatura de calcinación varía entre 800 y 1000 °C, con tiempos de residencia de 2–4 horas en atmósfera controlada. El producto final son óxidos de tierras raras (RE_2O_3) de pureza superior al 99.9 %, aptos para aplicaciones en imanes, catalizadores y láseres (Kim et al., 2023).

Reacciones generales:

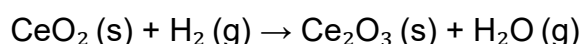


vi. Procesos redox especiales:

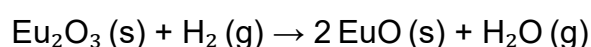
Algunos elementos de tierras raras presentan múltiples estados de oxidación, lo que requiere tratamientos redox controlados para obtener productos de valencia definida. Los casos más relevantes son el cerio ($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$), el europio ($\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$), el terbio ($\text{Tb}^{3+}/\text{Tb}^{4+}$) y el samario ($\text{Sm}^{3+}/\text{Sm}^{2+}$).

Los procesos redox se llevan a cabo en atmósferas reductoras o oxidantes controladas a altas temperaturas (800–1200 °C), según el elemento objetivo. Las reacciones generales son:

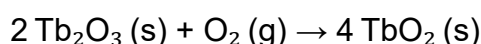
Reducción de Ce^{4+} a Ce^{3+} :



Oxidación de Eu^{3+} a Eu^{2+} (para fósforos):



Oxidación de Tb^{3+} a Tb^{4+} :



La siguiente tabla (Tabla 11), muestra los rendimientos aproximados de recuperación por tipo de mena:

Tabla 11. Recuperación por tipo de mena de REE según la ruta de purificación y separación.

Mena	Método preferido	Rendimiento (%)
Monacita	Oxalato → Calcinación	90–95
Bastnasita	Carbonato → Calcinación	85–90
Xenotima	Oxalato selectivo	80–88
Arcillas iónicas	Precipitación directa → REO	70–80

2.5.6 Metodos de obtención de REE

La producción de tierras raras puede clasificarse en dos grandes categorías: producción primaria a partir de minerales (Bastnasita, Monacita, arcillas adsorbidas) y producción secundaria a partir de materiales reciclados (imanes NdFeB, lámparas fluorescentes, residuos electrónicos) u relaves mineros.

2.5.6.1 PRODUCCIÓN PRIMARIA

A continuación, se presenta en la Tabla 12, el resumen de la producción primaria de REE según la mena:

Tabla 12. Producción primaria de REE a partir de minerales.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Lixiviación de Bastnasita	Procesamiento mediante conversión alcalina o tostado con ácido sulfúrico.	Permite recuperar REE ligeros; procesos consolidados en China y EE.UU.	Uso intensivo de químicos corrosivos; generación de residuos tóxicos.
Lixiviación de Monacita	Digestión con NaOH concentrado a altas temperaturas.	Alta eficiencia (>95%); subproducto útil (Na_3PO_4).	Genera residuos radiactivos (Th); requiere molienda fina.

Arcillas adsorbidas	Intercambio catiónico con sales como (NH ₄) ₂ SO ₄ o NaCl.	Proceso simple; bajas temperaturas; alta recuperación (90-95%).	Bajas concentraciones de REE; impacto ambiental por lixiviantes.
---------------------	--	---	--

2.5.6.1.1 LIXIVIACIÓN DE BASTNASITA

La bastnasita es un fluoro-carbonato de tierras raras con fórmula general RECO₃F, cuya química real presenta sustituciones y asociaciones con Ca, Fe, y trazas de Th. Suele concentrar LREE (Ce, La, Nd, Pr). La presencia de F⁻ confiere estabilidad a la red y condiciona el pretratamiento, pues los fluoruros de REE pueden ser poco solubles si no se convierten previamente a hidróxidos u otras sales reactivas. La mena se beneficia por flotación previa y reducción de ganga carbonatada.

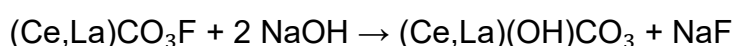
Históricamente se exploraron lixiviaciones directas ácidas (HCl, H₂SO₄), pero los esquemas industriales modernos privilegian:

- I. conversión alcalina con NaOH seguida de disolución ácida
- II. tostación con ácido sulfúrico concentrado y posterior lixiviación salina
- III. rutas clorurantes/hidrociorurantes con oxidación de Ce³⁺ a Ce⁴⁺ cuando se requiere separar cerio.

2.5.6.1.1.1 Conversión Alcalina

Tratamiento de digestión en medio fuertemente alcalino (NaOH o KOH, en concentraciones superiores al 70% en peso) y a altas temperaturas (150–200 °C), en autoclave. Busca reemplazar el flúor en la estructura de la bastnasita por grupos hidroxilo, generando compuestos hidroxilados/carbonatados de REE más solubles en ácido (activación del mineral), maximizando la eficiencia de recuperación en procesos hidrometalúrgicos posteriores. Tiempo: 2-4 horas.

La reacción simplificada es la siguiente:



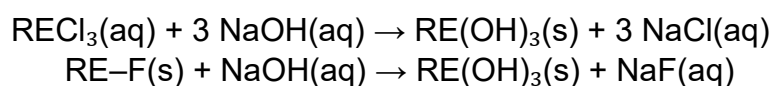
El NaF pasa a la solución alcalina o cristaliza, mientras que el sólido resultante es un carbonato-hidróxido de tierras raras más reactivo frente a lixiviación ácida.

Secuencia típica de tres etapas (Kruesi & Duker, Molycorp):

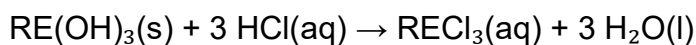
- a. Ataque con HCl 25–32% para remover la fracción carbonatada y formar cloruros de REE:



- b. Conversión alcalina a hidróxidos para capturar F⁻ y descomponer fluoruros de REE:



- c. Disolución controlada de $\text{RE}(\text{OH})_3$ en ácido (HCl o H_2SO_4) para alimentar separación (SX):



Los desafíos más relevante son gestionar adecuadamente el NaF generado, aunque puede recuperarse como subproducto, condiciones de eficiencia en el uso de NaOH/KOH por su alto consumo, con impacto en costos y buscar posibilidad de explorar alternativas como la desfluoración térmica, aunque la conversión alcalina sigue siendo la práctica industrial estándar.

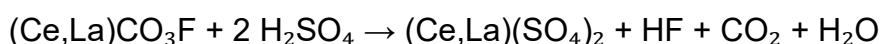
2.5.6.1.1.2 Tostación con Ácido Sulfúrico Concentrado y Lixiviación Salina

La tostación con ácido sulfúrico concentrado, seguida de una lixiviación salina, constituye una de las rutas hidrometalúrgicas clásicas para el procesamiento de minerales portadores de tierras raras (REE), en especial monacita y bastnasita. Este proceso permite transformar los minerales refractarios en fases solubles y separar los óxidos de tierras raras de las impurezas acompañantes.

La primera etapa consiste en la mezcla del mineral finamente molido con ácido sulfúrico concentrado (95–98%), en una proporción típicamente de 1–2 veces la masa de mineral. La mezcla se somete a una tostación controlada a temperaturas de 400–500 °C durante 1–3 horas.

Durante este tratamiento térmico, el ácido sulfúrico reacciona con los fosfatos y fluorocarbonatos de tierras raras, transformándolos en sulfatos solubles de REE. Al mismo tiempo, se libera gases como HF, SiF_4 y SO_x , que deben ser tratados mediante sistemas de control ambiental.

Las reacciones pueden simplificarse de la siguiente forma:



Los REE se convierten en sulfatos solubles, mientras que el fósforo queda como ácido fosfórico.

El producto de la tostación se somete luego a una lixiviación con soluciones salinas, generalmente cloruro de sodio (NaCl) o soluciones ácidas diluidas. En esta etapa, los sulfatos de tierras raras se disuelven en el medio acuoso, mientras que fases refractarias como sílice y algunos óxidos de hierro permanecen insolubles, lo que hace una alternativa de alta recuperación de REE desde minerales refractarios. En Bayan Obo (China) y esquemas históricos de Mountain Pass, esta ruta fue/ha sido aplicada.

Granulometría de $d_{80} < 75\text{--}150 \mu\text{m}$ favorece conversión, mientras que una flotación previa eleva ley de REO.

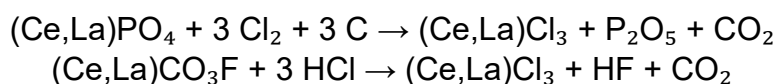
Los desafíos más relevante son el alto consumo de ácido sulfúrico y la generación de gases tóxicos (HF, SO_x , SiF_4) que necesitan tratamiento

(scrubbing), por lo que un control inadecuado podría generar un gran impacto ambiental.

Rutas Clorurantes e HCl Directa con Control de Cerio

Las rutas clorurantes consisten en la conversión de los minerales de REE en cloruros mediante agentes clorurantes como Cl_2 gaseoso, HCl concentrado o mezclas de $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$ a alta temperatura (400–900 °C). Estas condiciones favorecen la formación de cloruros de tierras raras (LnCl_3), que presentan alta solubilidad en soluciones acuosas.

Ejemplos de reacciones simplificadas:



Los cloruros resultantes se disuelven fácilmente en agua o ácidos diluidos, facilitando la recuperación posterior.

Ataque directo con HCl

El ataque directo con ácido clorhídrico concentrado (6–12 M) a temperaturas de 80–120 °C permite disolver parcial o totalmente minerales como bastnasita o monacita sin etapas térmicas previas. Esta técnica es más eficiente cuando el mineral ha sido previamente activado (por molienda fina o tratamientos previos).

En este caso, los REE se solubilizan como cloruros (LnCl_3), mientras que algunas impurezas (SiO_2 , Fe_2O_3) permanecen insolubles. La ventaja es la eliminación de pasos de tostación, aunque el consumo de ácido puede ser alto.

Control de Cerio (Ce)

El cerio es el único lantánido que puede oxidarse fácilmente de Ce^{3+} a Ce^{4+} en condiciones ácidas oxidantes. Durante la lixiviación con HCl o en rutas clorurantes, se aprovecha esta característica para separar el cerio del resto de los REE.

La estrategia de control consiste en oxidar selectivamente el Ce^{3+} a Ce^{4+} , la pareja $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ tiene un potencial estándar relativamente alto, lo que significa que Ce^{3+} puede oxidarse a Ce^{4+} en presencia de oxidantes fuertes. Empleando oxidantes como Cl_2 , H_2O_2 o KMnO_4 y precipitarlo como CeO_2 insoluble. Así, la disolución de REE se enriquece en LREE/HREE diferentes al cerio, mejorando la pureza de la solución para etapas posteriores de separación.

Los desafíos más relevantes son el elevado consumo de HCl en el ataque directo, las altas temperaturas y la necesidad de equipos resistentes a la corrosión. Y ambiental, es la generación de gases Cl_2 y residuos de ácido que requieren una correcta gestión.

2.5.6.1.2 LIXIVIACIÓN DE MONACITA

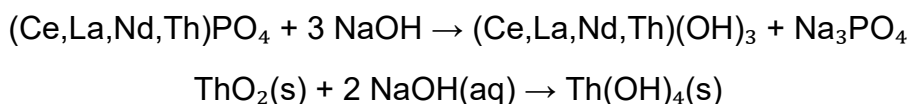
La monacita es un ortofosfato de tierras raras, fórmula general REEPO_4 , que concentra LREE (Ce, La, Nd, Pr) junto con torio y, en menor medida, uranio. Su

dureza química deriva de la fuerte red P–O, lo cual exige condiciones agresivas para su descomposición. Contenidos típicos: 50–70% REO, con 0.1–10% ThO₂, lo que implica restricciones ambientales y de seguridad en el tratamiento y disposición de residuos.

2.5.6.1.2.1 Digestión alcalina con NaOH

La digestión alcalina consiste en el tratamiento de la monacita finamente molida (<45 µm) con NaOH concentrado (40–70% en peso) a altas temperaturas (140–150 °C, usualmente en autoclaves (resistentes a corrosión), con una relación NaOH/mineral de 3:2–2:1 (en masa). Durante esta reacción, el fosfato de tierras raras se descompone, liberando REE como hidróxidos y produciendo fosfato de sodio soluble.

La reacción global puede representarse como:



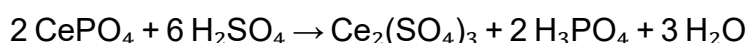
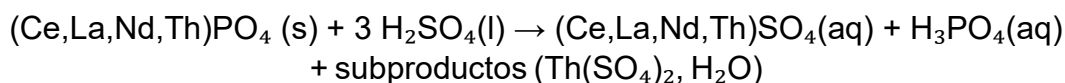
De esta manera, la reacción produce que los REE pasen a la forma de hidróxidos, mientras que el fósforo se elimina como fosfato de sodio, Na₃PO₄ soluble, que puede recuperarse como subproducto. Posteriormente, los REE(OH)₃ se disuelven en ácido (HCl o H₂SO₄) para alimentar SX.

Esta etapa tiene una alta recuperación (>95%), subproducto comercializable (Na₃PO₄) y evita la liberación de HF, pero un consumo elevado de NaOH y la posible generación de residuos radiactivos (Th, U).

2.5.6.1.2.2 Digestión Ácida (H₂SO₄ concentrado)

La monacita, por su estructura fosfática estable, requiere temperaturas superiores a 200 °C y ácido concentrado (>90 %) para lograr una disolución efectiva (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Tang et al., 2020).

La monacita puede descomponerse con H₂SO₄ :

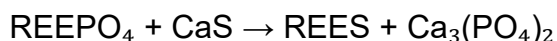


Se liberan fosfatos solubles y se forman sulfatos de REE. El licor se somete a separación posterior por SX o precipitación. Método aplicado históricamente en India y Brasil. Durante la digestión, el torio presente también se disuelve parcialmente formando sulfato de torio (Th(SO₄)₂), el cual puede precipitar posteriormente como hidróxido o fosfato insoluble tras la dilución (Zhang et al., 2021).

2.5.6.1.2.3 Procesos Alternativos (Cloración y Sulfuración)

Se han desarrollado procesos con CaCl₂/CaCO₃ en atmósfera reductora-sulfurante (Merritt, 1990):





Estos procesos tienen la ventaja que estabilizan al torio como ThO_2 y permiten disolver REE como cloruros/oxisales. Aunque prometedores, presentan recuperaciones menores (89–92%) comparado con la vía alcalina.

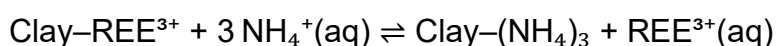
2.5.6.1.3 ARCILLAS ADSORBIDAS DE IONES

Las arcillas iónicas (ion-adsorbed clays), representan una fuente secundaria estratégica de elementos de tierras raras (REE), especialmente de los elementos pesados (HREE) como itrios, disprosio, terbio y gadolinio. Clay representa la matriz de arcilla—fundamentalmente minerales laminares aluminosilicatos (p. ej., caolinita y haloisita en perfiles muy meteorizados, y en menor medida esmectitas/illitas)—con sitios de intercambio en sus superficies y bordes. Estas superficies poseen carga negativa neta (permanente o dependiente del pH) y se coordinan con cationes del medio para mantener la electroneutralidad. A diferencia de menas como la monacita o bastnasita, la recuperación desde arcillas iónicas no requiere trituración ni altas temperaturas, lo que reduce los costos y el impacto ambiental (Binnemans et al., 2018; Wang et al., 2022).

2.5.6.1.3.1 Lixiviación por intercambio iónico (IXL)

El proceso metalúrgico comienza con la lixiviación, que consiste en liberar los iones REE^{3+} desde la superficie de las arcillas mediante la introducción de soluciones salinas. Los reactivos más utilizados son sulfato de amonio $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, cloruro de amonio (NH_4Cl) , sulfato de magnesio (MgSO_4) y cloruro de sodio (NaCl) , en concentraciones de 0.3–0.5 M. El intercambio iónico ocurre sin disolver la matriz arcillosa, lo que lo convierte en un proceso altamente selectivo y de baja contaminación (Yang et al., 2023; Zhang et al., 2021).

Reacción general:



La reacción es favorecida por el exceso de NH_4^+ y por un pH ligeramente ácido, entre 3 y 4 (Chi & Tian, 2020). A este pH, los protones contribuyen a la protonación de grupos $-\text{OH}$ en los bordes de la arcilla, facilitando la liberación de los REE^{3+} hacia la fase líquida (Yang et al., 2013).

Asimismo, la concentración óptima de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ se sitúa entre 0,1 y 0,15 M, ya que incrementos superiores ofrecen beneficios marginales en la recuperación (Ausenco, 2021). La relación S/L próxima a 1:3 y tiempos de contacto de 10–20 minutos son suficientes para alcanzar niveles de extracción superiores al 85% (Herrera, 2022).

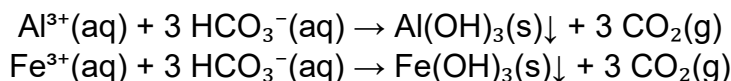
En condiciones naturales, la proporción de REE adsorbidos como complejos internos versus externos depende del tipo de arcilla y del radio iónico del catión (Yang et al., 2019).

2.5.6.1.3.2. Lavado y neutralización del licor

La solución rica obtenida tras la lixiviación contiene, además de REE^{3+} , pequeñas cantidades de Al^{3+} , Fe^{3+} y Mn^{2+} . Para eliminar estas impurezas, se adiciona bicarbonato de amonio $(\text{NH}_4\text{HCO}_3)$, elevando el pH hasta

aproximadamente 6. En este rango, los iones Al^{3+} y Fe^{3+} precipitan como hidróxidos, mientras los REE^{3+} permanecen en solución debido a su mayor estabilidad en complejos amonio-carbonato (Tang et al., 2021).

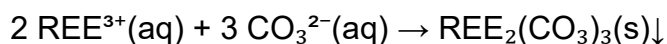
La reacción puede representarse como:



El control de pH es esencial para evitar pérdidas de REE por co-precipitación. En esta etapa se logra una purificación selectiva con eficiencia superior al 90%, reduciendo significativamente las impurezas antes de la precipitación final (Chi & Tian, 2020; Ausenco, 2021).

2.5.6.1.3.3 Precipitación de REE

Una vez purificado el licor, los REE^{3+} se precipitan como carbonatos, oxalatos o hidróxidos dependiendo del agente precipitante empleado. El método más común es el carbonato, mediante la adición de NH_4HCO_3 o Na_2CO_3 hasta ajustar el pH entre 7,2 y 7,5 (Herrera, 2022). Las reacciones químicas pueden expresarse como:



El precipitado obtenido presenta una pureza superior al 90%. Entre las ventajas del método de carbonatación se encuentran su bajo costo, compatibilidad con el uso de reactivos amoniacales y la facilidad para controlar el pH. Sin embargo, puede ocurrir co-precipitación de impurezas si el pH supera 7,6 (Yang et al., 2019). En algunos circuitos, se emplean agentes oxálicos ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) para producir oxalatos de alta pureza y reducir el contenido de carbonato residual (IRENA, 2022).

2.5.6.1.3.4 Filtración, secado y calcinación

Finalmente, el precipitado sólido se separa por filtración al vacío o mediante filtros prensa, seguido de un lavado secuencial con agua desionizada para eliminar restos de amonio y sulfato (Ausenco, 2021). El efluente generado se reincorpora al circuito como solución de lixiviación, cerrando el ciclo de agua y reactivos (IRENA, 2022). Este enfoque de circuito cerrado permite una reducción significativa del consumo de agua (hasta un 90%) y minimiza la descarga de efluentes. Además, la recuperación de amonio mediante stripping o intercambio iónico complementa la sostenibilidad del proceso (Binnemans et al., 2018).

Entre las ventajas del circuito cerrado destacan la reducción del impacto ambiental, la menor huella hídrica y la posibilidad de recuperar agua y reactivos en un porcentaje elevado. Las principales limitaciones incluyen la necesidad de equipos resistentes a la corrosión y un monitoreo continuo de la calidad de las soluciones (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Posteriormente, el precipitado lavado se somete a un proceso de secado a 105 °C y calcinación controlada entre 800 y 900 °C para transformar los carbonatos en óxidos de tierras raras (REE_2O_3), según la siguiente reacción (González-Plaza, 2021):



La calcinación permite obtener un producto estable y apto para separación o refinación posterior. La principal ventaja de esta etapa es la obtención de óxidos de alta pureza y baja humedad; no obstante, requiere control térmico preciso para evitar sinterización y pérdida de superficie específica (Binnemans et al., 2018).

La siguiente tabla (Tabla 13), muestra las recuperación aproximada por tipo de mena:

Tabla 13. Recuperación según tipo de mena de REE.

Mena	Recuperación (%)	Subproductos	Impactos ambientales
Bastnasita	90–95	NaCl, NaF/CaF ₂	Emisiones HF/SO _x , residuos fluorados
Monacita	85–98	Na ₃ PO ₄ (alcalina), H ₃ PO ₄ (ácida), residuos Th/U	Radiactividad (Th/U), efluentes ácidos/fosfatos
Arcillas adsorbidas	80–95	Soluciones residuales con NH ₄ ⁺ /SO ₄ ²⁻	Contaminación de aguas subterráneas, erosión

CAPÍTULO III: MERCADO, NEGOCIO Y CONTEXTO ESTRATÉGICO

Glosario técnico

- Off-take agreement (contrato bilateral de suministro): acuerdo privado y de largo plazo entre un vendedor (mina, separador o refinador) y un comprador (trader, fabricante de aleaciones o imanes), que define volúmenes, especificaciones, calendario de entregas e incentivos/penalidades.
- Indexación: mecanismo por el que el precio liquidable del contrato se calcula tomando como base una publicación de precio de una PRA (por ejemplo, “NdPr Oxide FOB China, promedio mensual”) y aplicando ajustes convenidos.
- PRAs (Price Reporting Agencies): entidades privadas que recopilan transacciones/indicaciones, verifican datos y publican evaluaciones metodológicamente definidas (cobertura de productos, bases FOB/EXW/CIF, frecuencia, especificaciones de pureza y tamaño mínimo de negocio).
- Argus: evaluaciones para óxidos/metales (NdPr, Dy₂O₃, Tb₄O₇, CeO₂, La₂O₃, etc.), con guías metodológicas que describen fuentes de datos, especificaciones y validaciones.

- Fastmarkets: metodología específica para REE con bases (FOB China/EXW/CIF), unidades (USD/kg o CNY/kg), ventanas de publicación y reglas de exclusión de datos.
- Asian Metal: referencias ampliamente utilizadas en Asia (especialmente China); muchas fórmulas de contratos mencionan explícitamente su “market price”.
- Uso contractual: el índice PRA seleccionado se promedia en una ventana (diaria/quincenal/mensual) y se ajusta por calidad, logística, impuestos y conversión para obtener el precio liquidable.
- Unidades y cotización: precios típicos en \$/kg REO (p.ej., NdPr-O, Dy₂O₃, Tb₄O₇). Los metales y aleaciones pueden cotizar con primas/descuentos sobre los óxidos.
- EXW/FOB/CIF: términos Incoterms de base logística.
- NdPr-O: mezcla de óxidos de neodimio y praseodimio; referencia clave para imanes NdFeB.
- MREC: Mixed Rare Earth Carbonate (carbonato mixto).
- El mercado OTC (over-the-counter) es un mecanismo descentralizado de transacción en el cual compradores y vendedores negocian directamente, sin la intervención de una bolsa centralizada ni de una cámara de compensación.

3.1 Reservas Mundial

Según el U.S. Geological Survey, las reservas mundiales de óxidos de tierras raras alcanzan los 130 millones de toneladas métricas (t), concentradas principalmente en China, Vietnam, Brasil, Rusia, India, Estados Unidos y Australia. En América del Sur, Brasil lidera con 21 millones de toneladas, seguido por Chile con potencial en la Cordillera de la Costa (SERNAGEOMIN, 2024). Esta alta concentración geográfica otorga a China un dominio del 60% de la producción mundial y más del 85% de la capacidad global de refinación (Rainbow Rare Earths, 2024). Además, se muestra el comportamiento de años anteriores de las reservas mundiales en la Tabla 14.

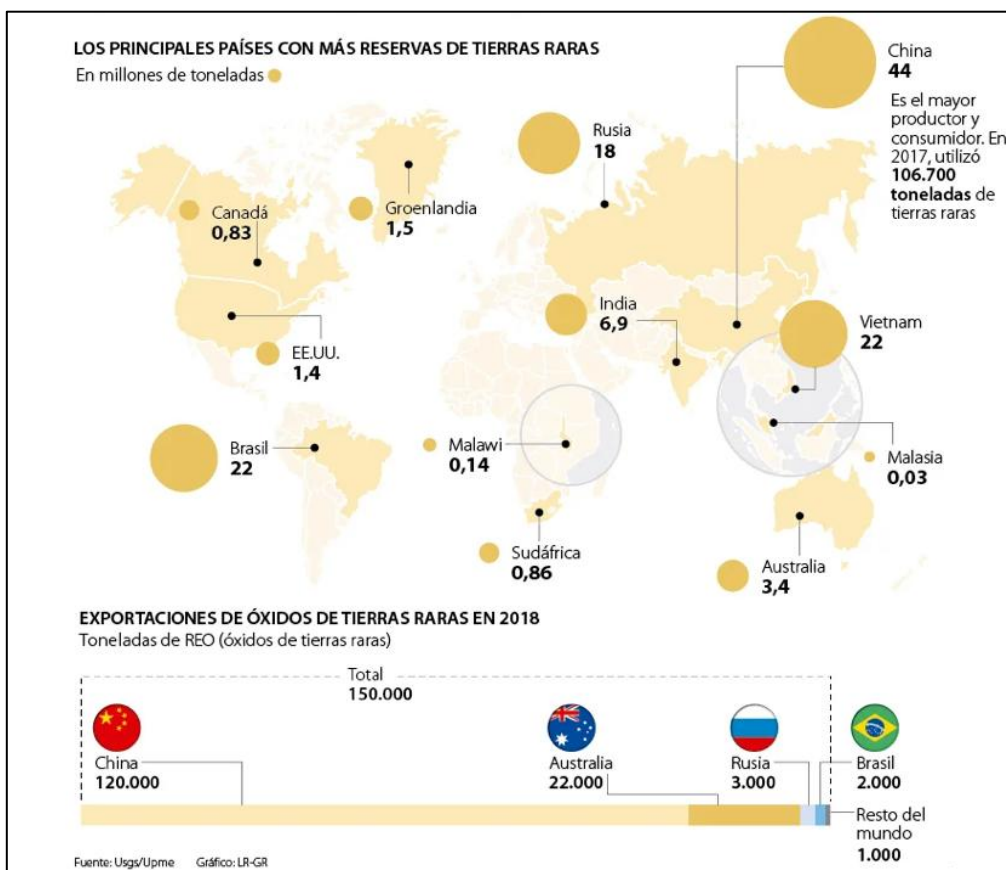


Ilustración 15. Principales países con más reservas de REE.

Fuente: USG 2024

Reparto de las reservas mundiales de tierras raras (2024)

En millones de toneladas.

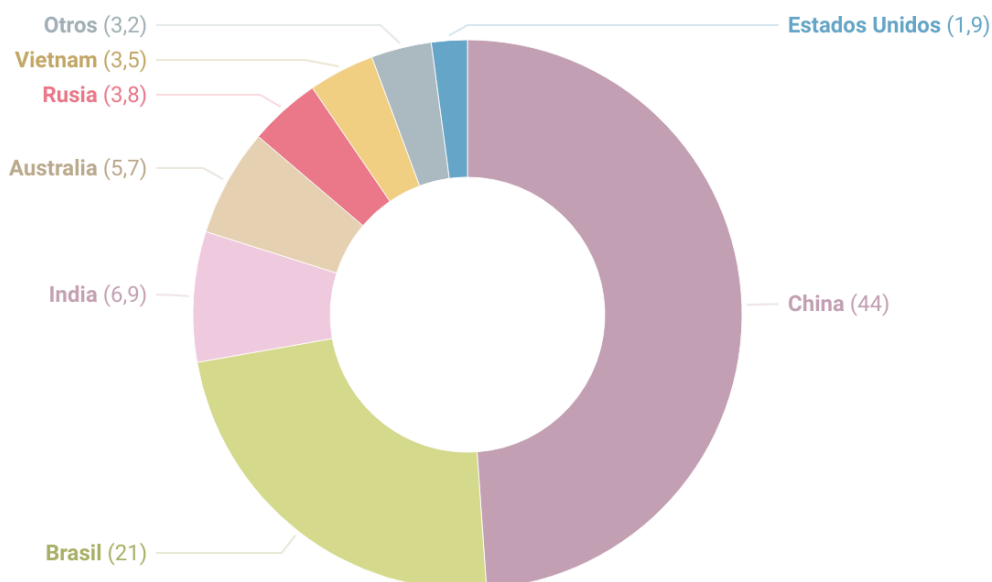


Figura 2. Reparto de reservas mundiales de REE (2024).

Fuente: USG 2024

Tabla 14. Reservas mundiales de ETR, años 2022 y 2023.

País/año	2022 Reservas (Mt)	2022 Participación (%)	2023 Reservas (Mt)	2023 Participación (%)
China	44	33,85	44	38,26
Vietnam	22	16,92	22	19,13
Brasil	21	16,15	21	18,26
Rusia	21	16,15	10	8,7
India	6,9	5,31	6,9	6
Otros países	15,1	11,62	11,1	9,65
Total mundial (aprox.)	130	100	115	100

Fuente: USGS (2023, 2024).

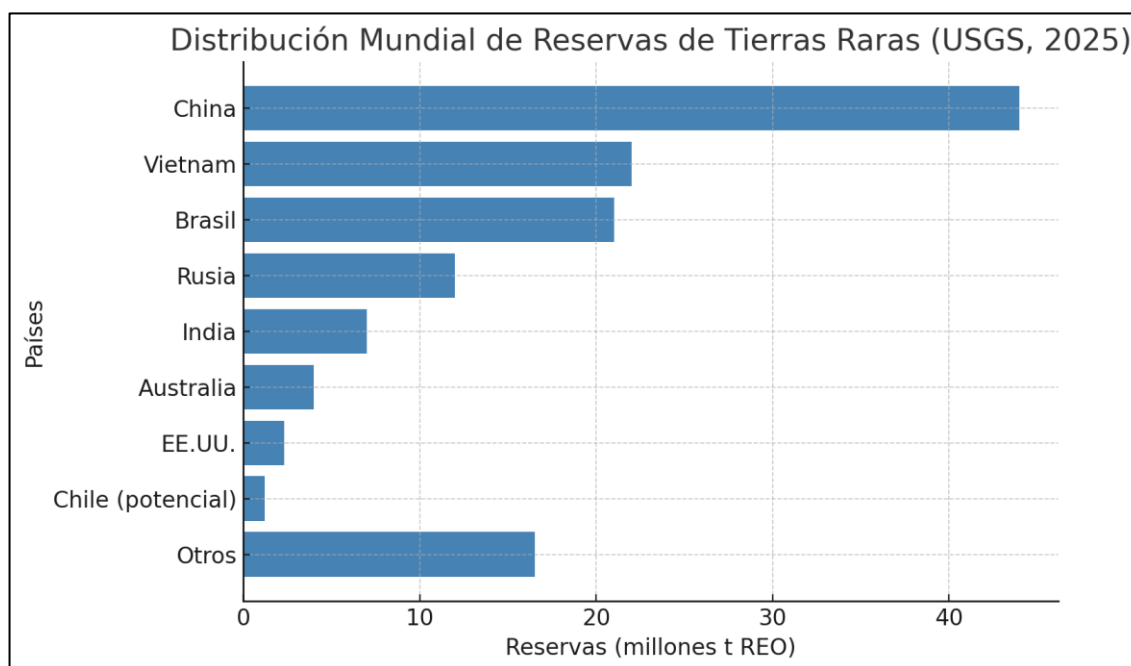


Figura 3. Gráfico reserva de REO por países incluyendo Chile.

Fuente: elaboración propia

La Figura 3 y Figura 3 presentadas permite visualizar de manera comparativa la distribución global de los yacimientos de tierras raras, diferenciando aquellos que se encuentran en operación, en etapa de desarrollo o en fase de nuevos proyectos. Este mapa evidencia la fuerte concentración de operaciones activas en China, Australia y Estados Unidos, mientras que en regiones como América Latina, África y Europa predominan iniciativas en desarrollo y exploración.

En la Ilustración 16 la representación gráfica facilita comprender no solo la localización de estos recursos estratégicos, sino también la evolución del mercado hacia una diversificación geográfica de la oferta, en la medida que más países avanzan en proyectos para reducir la dependencia del suministro chino y fortalecer la seguridad en cadenas de valor críticas.



Ilustración 16. Distribución de los yacimientos mundiales de ERR.

Fuente: Gómez Gabás, Natalia E. (2020). Global Strategy.

En el caso de Chile, estudios geológicos de SERNAGEOMIN comprueban la existencia de varios minerales críticos en territorio chileno, como se muestra en Ilustración 17, aunque muchos sin explotación minera, no se han cuantificado oficialmente las reservas de elementos de tierras raras. Chile posee un potencial geológico/minero mundialmente conocido por contener depósitos con una diversidad de elementos de interés.

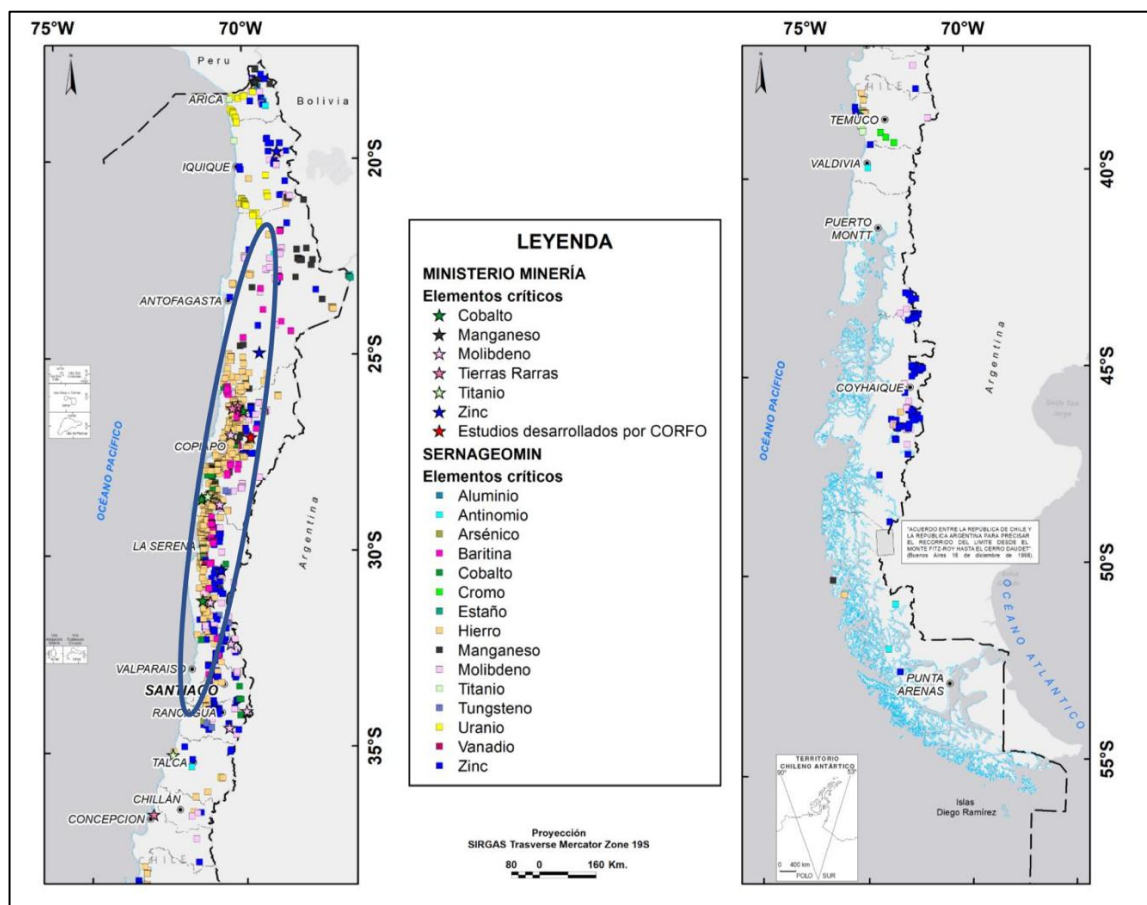


Ilustración 17. Minerales críticos en territorio chileno.

Fuente: Alta Ley en base a fuentes de Cochilco, Sernageomin y reportes de compañías mineras.

La zona destacada en azul, la cual corresponde a la Cordillera de la Costa entre las regiones de Tarapacá y de Valparaíso, existen depósitos tipo IOA e IOCG, conocidos por contener elementos estratégicos, como Tierras Raras, Cobalto, Manganeso, entre otros.

Sin embargo, en el proyecto Módulo Penco y en prospectos ubicados en la región de Atacama, se han realizado estimaciones de recursos (Tabla 15). El mayor grado de certeza en la determinación de recursos de ERR se ha logrado en Módulo Penco, donde se han definido recursos medidos e indicados, con base en un programa de sondajes (Ausenco Engineering Chile Ltda., 2021).

Por su parte, la exploración hecha en Cerro Carmen, región de Atacama, si bien determinó recursos indicados e inferidos, estuvo basada en un programa de muestreo en zanjas (Fortín y Serrano, 2000).

Tabla 15. Estimación de recursos en prospectos de ETR en Chile.

Proyecto	Tipo de recurso	Tonelaje (Mt)	Ley (%)	Contenido de ETR (t)
Módulo Penco	Medido + indicado	20,68	0,2426	50.178
Cerro Carmen	Indicado	3,87	0,08	2.944

Fuente: Ausenco Engineering Chile Ltda. (2021); Fortín y Serrano (2000).

3.2 Producción Mundial

La producción mundial de REE en 2024 alcanzó aproximadamente 240.000 toneladas, con China aportando 63% del total (USGS, 2025). El resto proviene de proyectos en Estados Unidos, Myanmar, Australia y Malasia. La cadena de valor se compone de cinco etapas: extracción minera, concentración, separación, refinación y manufactura avanzada. Sin embargo, solo un reducido número de países posee infraestructura para la separación y purificación, generando dependencia estructural (IRENA, 2022; Rainbow Rare Earths, 2024). En el año 2023, la producción mundial de tierras raras aumentó de 300.000 a 350.000 t de REO eq. (óxidos de tierras raras equivalente) respecto del año 2022 (USGS, 2024). Ese mismo año, China continuó liderando la producción mundial con un total de 240.000 t de REO eq. (Tabla X), en torno al 70% de la producción anual (USGS, 2024).

Durante las décadas previas al año 2010, China lideró ampliamente la producción mundial de ERR, la que alcanzó a representar hasta más del 90% de la producción y oferta de estos elementos (Schulz *et al.*, 2017). Consolidó un dominio casi absoluto sobre la producción de elementos de tierras raras (ERR), lo que configuró un escenario de dependencia internacional respecto de su capacidad extractiva y de procesamiento (Schulz *et al.*, 2017).



Figura 4. Producción de REE por países.

Fuente: Servicio geológico ucraniano e Instituto para el Estudio de la Guerra

La producción mundial de los años 2022 y 2023, expresada en REO eq., se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Producción mundial de ETR y tipos de depósitos, años 2022 y 2023.

País/año	2022 Producción (t)	2022 Participación (%)	2023 Producción (t)	2023 Participación (%)	Tipo de depósito
China	210.000	70,00	240.000	68,57	Rocas ígneas alcalinas/peralcalinas, carbonatitas, arcillas.
EE.UU.	43.000	14,33	43.000	12,29	Carbonatitas, arcillas, hidrotermal/IOCG, rocas alcalinas/peralcalinas.
Australia	18.000	6,00	18.000	5,14	Carbonatitas, arcillas, hidrotermal/IOCG y

					rocas alcalinas/peralcalinas.
Myanmar	12.000	4,00	38.000	10,86	Carbonatitas, placer.
Tailandia	7.100	2,37	7.100	2,03	Placer de minerales pesados.
Otros	7.820	2,61	7.220	2,06	-
Total mundial	300.000	100	350.000	100	-

Fuente: USGS (2023, 2024); Liu et al. (2023).

Además de la concentración geográfica de los depósitos, la exploración y la explotación, es importante considerar la capacidad de procesamiento, en particular de refinación, que se debe tener presente en la configuración del mercado y en el nivel de criticidad de este grupo de elementos, y respecto del cual China controla en torno al 90%.

En Chile no se registra producción actual ni histórica de ERR. Sí existen proyectos de exploración actual, que eventualmente podrían llegar a producir tierras raras en el país.

Su producción y reservas están altamente concentradas en un reducido número de países, lo que genera vulnerabilidades estructurales en la cadena global de suministro (IRENA, 2022; USGS, 2025).

El análisis del grado de concentración se puede cuantificar mediante el Índice Hirschman-Herfindahl (HHI), utilizado comúnmente en economía minera para evaluar la dominancia de mercado (Gupta, Williams, & Gaustad, 2023). El índice de concentración Hirschman–Herfindahl (HHI) es una medida cuantitativa del grado de concentración de un mercado que se calcula como la suma de los cuadrados de las participaciones de mercado de todos los actores (o, en el caso de recursos, de las participaciones por país o empresa) (U.S. DOJ & FTC, 2010; OECD, 2023).

El índice tiene su raíz en el “índice de concentración” propuesto por Albert O. Hirschman en el marco de su análisis del comercio exterior y el poder económico (Hirschman, 1945), y fue desarrollado independientemente por Orris C. Herfindahl en su tesis doctoral sobre la industria del acero de EE. UU. (Herfindahl, 1950/1955). La literatura de organización industrial y competencia adoptó el HHI como métrica estándar durante la segunda mitad del siglo XX, y hoy es central en la evaluación de fusiones, dominancia y riesgos de mercado (Carlton & Perloff, 2015; U.S. DOJ & FTC, 2010).

Formalmente, si s_i representa la participación de mercado del agente i (en fracción decimal), el HHI se define como:

$$HHI = \sum s_i^2 \text{ para } i = 1 \dots N;$$

alternativamente, si las participaciones se expresan en porcentaje, se usa:

$$HHI = \sum (100 \cdot s_i)^2$$

con rango 0–10.000 (U.S. DOJ & FTC, 2010).

Los umbrales comúnmente aceptados por las autoridades de competencia son: $HHI < 1.500$ (mercado no concentrado), $1.500-2.500$ (moderadamente concentrado) y > 2.500 (altamente concentrado), equivalentes a $<0,15$; $0,15-0,25$; $>0,25$ en escala 0–1 (OECD, 2023; Carlton & Perloff, 2015).

Desde la perspectiva económica, un HHI elevado indica que unas pocas firmas o países concentran la mayor parte de la oferta, lo que puede traducirse en menor elasticidad de la oferta, mayor volatilidad de precios y mayor exposición a riesgos geopolíticos (IEA, 2023; IRENA, 2022). En mercados de materias primas estratégicas —como litio, cobalto o tierras raras— el HHI captura dimensiones críticas de seguridad de suministro y resiliencia industrial (World Bank, 2022; IEA, 2023).

El HHI calculado para las reservas mundiales de tierras raras en 2025 es aproximadamente **0.199**, lo que refleja un mercado altamente concentrado, dominado por China y un reducido número de productores regionales (USGS, 2025; IRENA, 2022).

En minerales críticos, informes recientes estiman HHI elevados en refinación: tierras raras (REE) y cobalto exhiben alta concentración en etapas de procesamiento, con China concentrando $>60\%$ de producción de REE y $>85\%$ de capacidad de refinación, lo que empuja el HHI a niveles de “altamente concentrado” (IRENA, 2022; USGS, 2025; Rainbow Rare Earths, 2024). La International Energy Agency aplica el HHI para comparar concentración entre extracción y refinación de litio, níquel y REE, evidenciando que la refinación presenta mayores HHI que la minería primaria (IEA, 2023; World Bank, 2022).

Estudios recientes (Gielen & Lyons, 2022; IEA, 2023) señalan que la diversificación geográfica de la oferta podría reducir el HHI global a valores inferiores a 0.20 hacia 2040, siempre que se concreten inversiones en procesamiento y refinación fuera de Asia.

En este contexto, América Latina se perfila como un actor emergente, con potencial geológico competitivo y condiciones políticas favorables para la atracción de capital (Rainbow Rare Earths, 2024; Ausenco, 2021).

En la práctica corporativa y regulatoria, el HHI se ha utilizado para evaluar integraciones en minería y metales; por ejemplo, análisis antimonopolio de intentos de consolidación en mineral de hierro, potasa y carbón han empleado HHI para valorar el cambio en concentración (ΔHHI) y el nivel post-fusión (OECD, 2023; Carlton & Perloff, 2015).

El HHI ofrece ventajas de simplicidad, comparabilidad temporal y sensibilidad a cambios en liderazgos, pero no captura por sí solo barreras de entrada, sustitución tecnológica, integración vertical ni riesgos ESG, por lo que debe complementarse con indicadores de resiliencia de cadena y análisis de elasticidades (OECD, 2023; World Bank, 2022). En minerales críticos, su lectura debe acompañarse de métricas de concentración por etapa (extracción, procesamiento, manufactura) y de diversificación geográfica de proyectos (IEA, 2023; IRENA, 2022).

En mercados de mineral de hierro afectados por posibles JVs entre productores globales, los reguladores han considerado que alzas relevantes de HHI podrían afectar competencia en contratos de largo plazo (OECD, 2023).

Para Chile, el HHI es pertinente en dos dimensiones:

- i. evaluación de concentración en mercados donde el país es actor relevante (cobre, litio)
- ii. análisis de riesgo y posicionamiento en REE emergentes (SERNAGEOMIN, 2024; Ministerio de Minería, 2022).

En REE, la literatura técnica sitúa el HHI de refinación en valores altos por la centralidad de China, por lo que iniciativas chilenas de desarrollo de separación y procesamiento podrían contribuir a reducir el HHI global, diversificando la oferta (IRENA, 2022; USGS, 2025; Del Valle et al., 2021).

En síntesis, el HHI es una herramienta estandarizada y robusta para cuantificar concentración y apoyar decisiones de política pública, inversión y seguridad de suministro.

Su empleo en mercados de tierras raras, litio y cobalto contribuye a identificar cuellos de botella, priorizar inversiones en procesamiento y orientar alianzas estratégicas que reduzcan riesgos sistémicos (IEA, 2023; IRENA, 2022; World Bank, 2022; USGS, 2025).

3.2.1 Usos

Los elementos de tierras raras (REE) son elementos esenciales para tecnologías modernas, incluyendo imanes permanentes, motores eléctricos, turbinas eólicas, iluminación eficiente, catalizadores y dispositivos electrónicos. Su relevancia proviene de sus propiedades electrónicas únicas, como la configuración 4f parcialmente ocupada, que permite altos momentos magnéticos, estabilidad térmica y fuerte anisotropía magnética (Gielen & Lyons, 2022).

3.2.1.1 Imanes permanentes

Existen cuatro tipos principales de materiales utilizados en la fabricación de imanes permanentes modernos (Tabla 17), cada uno con diferente composición química, estructura y propiedades magnéticas: ferrita (cerámica), AlNiCo (aluminio-níquel-cobalto), SmCo (samario-cobalto) y NdFeB (neodimio-hierro-boro) (AI FutureSchool, 2023).

Tabla 17. Composición aproximada y método de fabricación de distintos tipos de imanes permanentes.

Tipo de imán	Composición química (aprox.)	Método de fabricación típico
Ferrita cerámica	~Fe ₂ O ₃ (80–90%) + BaCO ₃ o SrCO ₃ (10–20%) (Fase Ba,SrFe ₁₂ O ₁₉)	Pulvimetalurgia cerámica: mezcla de polvos, <i>calcinación</i> , sinterización y magnetización final en campo.
AlNiCo	Fe (bal.) + Al (8–12%), Ni (15–26%), Co (5–24%), Cu (≤6%), Ti (≤1%)	Fundición en molde y enfriamiento controlado (a veces bajo campo para anisotropía) o sinterizado de polvos atomizados; usualmente magnetización después del formado.

Samario-Cobalto	Sm (25–40%), Co (45–60%), Fe (0–20%), Cu/Zr/etc. ($\leq 5\%$)(Fases SmCo_5 o $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$)	Pulvimetalurgia de tierras raras: fundición de aleación, molienda fina, compactación en campo magnético, sinterización a alta T y temple; magnetización final con campo pulso intenso.
Neodimio-Hierro-Boro	Nd (30%), Fe (65%), B (1%), +Pr, Dy, etc. (resto) (Fase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ principal)	Pulvimetalurgia avanzada: fundición al vacío, enfriamiento rápido, molienda, alineación en campo y prensa, sinterización y tratamiento térmico; recubrimiento protector y magnetización final.

Como se observa en la tabla anterior, las ferritas son compuestos cerámicos de óxidos de hierro y AlNiCo es una aleación metálica principalmente ferrosa con aditivos, mientras SmCo y NdFeB son aleaciones de tierras raras combinadas con metales de transición (Co o Fe). Estos últimos dos se consideran imanes de tierras raras.

A continuación, se describen los dos imanes que contienen tierras raras en su composición:

3.2.1.1.1 Imanes de samario-cobalto (SmCo):

Pertenecen a la familia de imanes de tierras raras, desarrollados en los años 1970. Son aleaciones de samario (Sm) y cobalto (Co) principalmente, a menudo con pequeñas adiciones de otros metales para optimizar propiedades. Existen dos series comunes: SmCo_5 (serie 1:5) y $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (serie 2:17). En términos de composición, los imanes SmCo contienen aproximadamente 25–40% de samario y 60–75% de metales de transición (mayormente cobalto, además de Fe, Cu, Zr, etc.). Por ejemplo, SmCo_5 *típicamente es 36% Sm y 64% Co en peso, mientras $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ contiene 25% Sm, 50% Co y el resto Fe, Cu y pequeños aditivos (Zr, Hf).* Estas aleaciones cristalizan en fases intermetálicas con altísima anisotropía magnética: la fase SmCo_5 (*hexagonal*) y la $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (rhomboédrica derivada de la estructura de Th_2Zn) presentan ejes fáciles de magnetización muy marcados gracias al fuerte acoplamiento espín-órbita del samario. Esto se traduce en coercitividad intrínseca muy alta incluso a temperatura elevada. De hecho, los SmCo toleran temperaturas de trabajo de 250–300 °C (algunos grados hasta 350 °C) sin perder propiedades magnéticas, con temperaturas de Curie que rondan 700–800 °C. Las dos series difieren en que SmCo_5 *tiene una saturación magnética algo menor pero es más fácil de magnetizar completamente, mientras $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ admite mayores productos energéticos a costa de requerir campos de imantación más intensos y a veces aditivos como el hierro para incrementar la magnetización de saturación y cobre/zircón para incrementar la coercitividad mediante endurecimiento por precipitación.* En cualquier caso, los imanes SmCo se fabrican típicamente por pulvimetalurgia. Debido a su contenido de Co, estos imanes son de color metálico grisáceo, duros y algo frágiles. Fueron cruciales en aplicaciones de alta tecnología antes del advenimiento del NdFeB , y aún se usan donde se requiere estabilidad térmica superior y resistencia a la corrosión.

3.2.1.1.2 Imanes de neodimio-hierro-boro (NdFeB):

Son actualmente los imanes permanentes más potentes disponibles comercialmente. Introducidos en 1983, están formados por una aleación de

neodimio (Nd), hierro (Fe) y boro (B) que cristaliza en la fase intermetálica $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, de estructura cristalina tetragonal. La composición típica de un imán NdFeB sinterizado es aproximadamente 29–32% Nd, 1–2% B y 66–70% Fe, pudiendo incluir además pequeñas fracciones de otros elementos como praseodimio (Pr) (que suele sustituir parcialmente al Nd), disprosio (Dy) o terbio (Tb) (para incrementar la coercitividad en imanes de alta temperatura). Mineralógicamente, el neodimio proviene de los lantánidos (tierras raras) y su incorporación junto al hierro produce un compuesto con magnetización de saturación alta y una anisotropía magnética extremadamente grande a lo largo de un eje cristalográfico definido. Esto da como resultado una remanencia y coercitividad muy elevadas para el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Las muestras comerciales suelen tener una matriz de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ con una fase rica en Nd en los bordes de grano (que ayuda a prevenir la desmagnetización mediante aislamiento de dominios). Al igual que el SmCo, los imanes de NdFeB se fabrican por pulvimetalurgia. Posteriormente suelen requerir tratamientos térmicos de revenido para optimizar la microestructura y las propiedades magnéticas. El resultado son imanes de color metálico plateado opaco, muy duros pero quebradizos, que requieren recubrimientos (níquel, zinc, resina epoxi, etc.) porque el NdFeB es químicamente reactivo y susceptible a la corrosión. Cabe destacar que los NdFeB tienen una temperatura de Curie relativamente más baja ($\sim 310^\circ\text{C}$ para $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ puro, típicamente $310\text{--}350^\circ\text{C}$ con dopantes), lo que limita su uso a temperaturas usualmente por debajo de 150°C a menos que contengan Dy/Tb (lo cual eleva H_{cJ} pero encarece el material). Pese a ello, a temperatura ambiente superan en remanencia (1.1–1.4 T) y producto de energía (hasta ~ 50 MGOe en los mejores grados) a todos los demás tipos de imán, lo que les permite generar campos muy intensos en volúmenes pequeños.

Propiedades Magnéticas Comparadas

Los diferentes tipos de imanes permanentes exhiben propiedades magnéticas muy distintas, acorde a su composición y microestructura. Los parámetros clave que caracterizan su comportamiento son:

Coercitividad

La coercitividad (H_c) corresponde al campo magnético inverso necesario para reducir la magnetización neta de un imán a cero después de haber sido saturado. En materiales como $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ o SmCo, la coercitividad elevada es consecuencia de su fuerte anisotropía cristalina y su resistencia a la inversión de dominios magnéticos, lo cual permite operación estable bajo campos desmagnetizantes presentes en motores de alta densidad de potencia (USGS, 2025).

Anisotropía Magnética

La anisotropía magnética es la preferencia energética de un material para orientar sus momentos magnéticos en direcciones cristalográficas específicas. En NdFeB, la estructura tetragonal confiere una anisotropía extremadamente alta, responsable de su elevado producto energético (BH_{max}), permitiendo diseñar máquinas eléctricas más compactas y eficientes (Market Review, 2024).

Bucle de Histéresis

El bucle de histéresis describe la relación $B\text{--}H$ durante ciclos de magnetización. Los imanes permanentes presentan bucles amplios, indicando alta retención de

magnetización y eficiencia en el almacenamiento de energía magnética. Una mayor área en el bucle implica mayor capacidad para resistir fluctuaciones externas, característica crucial en turbinas eólicas de accionamiento directo (Gielen & Lyons, 2022).

Remanencia

La remanencia (B_r) corresponde a la inducción magnética residual después de remover el campo aplicado. Imanes NdFeB presentan remanencias superiores a 1.2 T, facilitando altos torques en motores EV y permitiendo diseños con menor masa y mayor densidad de flujo (Jeyagopal, 2021).

Temperatura de Curie

La temperatura de Curie es el punto a partir del cual un material ferromagnético pierde su magnetización espontánea debido al incremento en la energía térmica que desordena los espines electrónicos. NdFeB posee temperaturas de Curie entre 310 y 340 °C, mientras que SmCo supera los 700 °C, siendo apto para aplicaciones de alta temperatura como turbinas aeronáuticas y sistemas de potencia (USGS, 2025).

Producto de Energía Máxima $(BH)_{max}$

El producto de energía máxima, $(BH)_{max}$, representa la densidad máxima de energía magnética utilizable en un imán. Se obtiene del cuadrante desmagnetizante del bucle B–H, en el punto donde el producto B·H es máximo. Este parámetro es crítico para el diseño de motores compactos y de alto rendimiento. Los imanes NdFeB alcanzan valores entre 35 y 55 MGOe, siendo los más altos entre los imanes comerciales, mientras que SmCo presenta 20–32 MGOe. Estas diferencias explican la preferencia por NdFeB en aplicaciones de movilidad eléctrica y energías renovables (Gielen & Lyons, 2022; Market).

3.2.1.2 Vehículos Eléctricos

La masa típica de REE en un motor eléctrico para vehículos alcanza entre 1 y 5 kg de imanes, equivalentes a 0,7–1,2 kg de Nd y Pr combinados, más pequeñas cantidades de Dy para estabilidad térmica (IRENA, 2022).

3.2.1.3 Turbinas Eólicas con Generadores de Imanes Permanentes (Direct-Drive)

Las turbinas eólicas modernas pueden clasificarse según el tipo de generador que emplean. Las turbinas tradicionales utilizan generadores de inducción o síncronos con excitación eléctrica, mientras que las turbinas de última generación incorporan generadores de imanes permanentes basados en tierras raras, principalmente NdFeB. Estas diferencias influyen en la eficiencia, mantenimiento y densidad de potencia del sistema (IRENA, 2022).

Las turbinas de accionamiento directo reemplazan la multiplicadora por un generador de imanes permanentes (PMG), utilizando imanes NdFeB. Estos elementos al poseer elevada coercitividad, remanencia y anisotropía magnética, permite generar campos magnéticos intensos sin alimentación externa (Gielen & Lyons, 2022).

El principio de funcionamiento continúa basado en la inducción electromagnética, pero al eliminar la necesidad de excitación externa y de multiplicadora, se reduce significativamente el mantenimiento y se incrementa la eficiencia, especialmente a bajas velocidades de rotación. Esta tecnología es ampliamente utilizada en turbinas offshore debido a su mayor confiabilidad (IRENA, 2022).

Las turbinas eólicas de accionamiento directo utilizan hasta 600–800 kg de imanes permanentes por aerogenerador de 3 MW, equivalentes a aproximadamente 200–250 kg de Nd-Pr y de 20 a 40 kg de Dy (Market Review, 2024).

3.2.1.4 Catalizadores Automotrices

Elementos como cerio (Ce) y lantano (La) se emplean en catalizadores automotrices por su capacidad de almacenamiento/oxidación de oxígeno. El CeO_2 alterna entre estados $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$, facilitando reacciones de reducción y oxidación en motores de combustión interna. Los catalizadores contienen entre 20 y 30 g de REE por unidad (USGS, 2025).

3.2.1.5 Iluminación y Láseres

El europio (Eu) y el terbio (Tb) son claves en fósforos para pantallas y LEDs debido a sus transiciones electrónicas $4f \rightarrow 4f$ altamente estables. Las bombillas fluorescentes contienen entre 1 y 3 mg de Eu y Tb por unidad, mientras que los láseres utilizan Nd^{3+} como dopante para lograr emisiones coherentes (Jeyagopal, 2021).

3.3 Mercado Global

El mercado de tierras raras (REE) se caracteriza por una estructura económica altamente particular, dominada por una cadena de valor concentrada, intensa dependencia tecnológica y mercados con baja elasticidad tanto en oferta como demanda. Estos factores generan comportamientos atípicos frente a movimientos de precios, comparados con otros commodities mineros (International Energy Agency [IEA], 2023; Cochilco, 2023).

3.3.1 Mercado OTC

Una bolsa líquida global corresponde a un mercado con altos volúmenes de transacción, estandarización contractual y transparencia en la formación de precios, como ocurre en LME o COMEX. En contraste, las tierras raras se negocian por completo fuera de bolsas, en acuerdos privados OTC debido a su naturaleza altamente especializada y a la concentración del refinado en China (Cochilco, 2023; IEA, 2023).

El mercado de tierras raras presenta una estructura excepcionalmente compleja, operan principalmente en mercados OTC y con muy baja estandarización, lo que genera opacidad en precios y dependencia de referencias técnicas (Argus Media, 2024; International Energy Agency [IEA], 2023). Al no existir un mercado bursátil estandarizado, los precios de referencia provienen de evaluadores especializados o PRAs (Price Reporting Agencies) como Argus, Fastmarkets y Asian Metal.

La formación de precio se realiza mayoritariamente vía contratos bilaterales (off-take agreements). Estos contratos fijan fórmulas de precio indexadas a las evaluaciones publicadas por agencias de reporte de precios. Debido a la ausencia de un mercado bursátil estandarizado para REE, la indexación a PRAs reemplaza la referencia de bolsa y se complementa con ajustes por calidad, logística, impuestos, conversión (óxido→metal) y otros.

El mercado OTC en resumen, se diferencia de los mercados bursátiles estandarizados en varios aspectos fundamentales que se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18. Resumen comparativo entre mercado OTC y Bursátil.

Aspecto	Mercado OTC	Mercado bursátil estandarizado
Transacciones	Bilaterales, privadas	Centralizadas, públicas
Estandarización	Contratos flexibles y adaptables	Contratos uniformes y regulados
Transparencia	Limitada, dependiente de evaluadores de precios	Alta, precios en tiempo real
Riesgo de contraparte	Elevado	Mitigado por cámara de compensación
Flexibilidad	Alta	Baja
Ejemplos	Tierras raras, swaps financieros	Cobre (LME), oro (COMEX)

En este contexto, los contratos a largo plazo y un segmento spot relativamente reducido toman fuerte peso. Los contratos de largo plazo son la base del comercio REE, especialmente entre mineras, refinadoras, fabricantes de imanes y sectores como automotriz y eólico. Estos acuerdos incluyen cláusulas take-or-pay, volúmenes garantizados y fórmulas indexadas a índices especializados, dado que no existe una bolsa formal (ERIA, 2025; BID, 2025).

La confidencialidad de estos contratos dificulta la transparencia del mercado, pero permite a las empresas reducir riesgos de abastecimiento en elementos críticos como Nd, Pr, Dy y Tb, fundamentales para motores eléctricos y turbinas eólicas (IRENA, 2022; Cochilco, 2023).

El segmento spot representa transacciones inmediatas, usualmente de menor volumen, destinadas a cubrir déficits operativos o variaciones de corto plazo. Aunque pequeño, es la base de los reportes de precios internacionales que utilizan agencias de benchmark para construir índices confiables (Argus Media, 2024; Market Review, 2024).

El spot está más desarrollado en China, donde operadores locales intercambian óxidos y metales REE en volúmenes moderados. Estos precios influyen en la referencia global y pueden fluctuar rápidamente ante cambios regulatorios o restricciones de exportación (IEA, 2023; Sernageomin, 2022).

El mercado se segmenta en dos grandes niveles:

- **Productos de Procesos:** Los productos primarios incluyen concentrados minerales, carbonatos, cloruros, y óxidos individuales como Nd_2O_3 ,

Pr_6O_{11} , Dy_2O_3 y Tb_4O_7 . Su comercialización depende de purezas entre 99–99.9 %, impurezas permitidas y presentación en polvo o lingote. Esta categoría es la base del comercio global (Gronen et al., 2019; Market Review, 2024).

- Productos industriales: Los productos industriales incluyen imanes NdFeB, fósforos, aleaciones avanzadas, catalizadores y materiales ópticos. Estos productos agregan alto valor, pero sus precios no son públicos debido a la naturaleza propietaria de las cadenas de suministro (IEA, 2023; IRENA, 2022).

En los contratos bilaterales se establecen términos detallados sobre producto, calidad, logística y fórmulas de precios. Los contratos bilaterales en REE incluyen:

- i. Producto: óxido individual (Nd_2O_3 , Dy_2O_3 , Tb_4O_7), mezcla (NdPr-O), carbonato mixto (MREC), metal o aleación.
- ii. Especificaciones: pureza (% , ppm), límites de impurezas (Fe, Ca, Mg, Th/U), humedad, formato de entrega.
- iii. Volumen y programación: tenor anual (1–5 años), entregas mensuales/trimestrales, cláusulas *take-or-pay*.
- iv. Incoterms y logística: EXW, FOB, CIF; puerto/punto de entrega; seguros.
- v. Precio: índice PRA + ajustes; moneda; calendario de valoración; *fallback* si la PRA no publica.
- vi. Muestreado/ensaye y QA/QC: laboratorio independiente, resolución de disputas de calidad.
- vii. Gestión de riesgo: *caps/floors*, revisión periódica, fuerza mayor, sanciones/export controls.
- viii. ESG y trazabilidad: certificaciones de origen y anexos de sostenibilidad.
- ix. Confidencialidad y resolución de controversias: jurisdicción, arbitraje, ley aplicable.

La siguiente tabla (Tabla 19), muestra ejemplos ilustrativos de cómo se estructuran contratos off-take, con el producto transado, el índice de referencia utilizado y los ajustes aplicados.

Tabla 19. Elementos que se estructuran en contratos off-take.

Elemento contractual	Qué define	Buena práctica
Producto y especificación	Pureza, impurezas límite, humedad, formato	Especificar métodos analíticos y laboratorios de referencia
Índice PRA y ventana	Qué evaluación y período de promedio	Alinear con Incoterms; establecer *fallbacks* claros
Ajustes de precio	VAT, impurezas, humedad, logística	Definir fórmulas y tolerancias; detallar base (EXW/FOB/CIF)
Conversión óxido→metal	Fee de conversión y rendimiento	Auditar *conversion fees* y acordar rendimientos estándar
Muestreo/ensayo	Procedimientos y resolución de disputas	Laboratorio independiente; duplicados y arbitraje
Riesgo/regulatorio	Fuerza mayor, sanciones/export controls	Cláusulas de revisión y *caps/floors*

ESG/origen	Trazabilidad certificaciones	y	Prima por procedencia/ESG cuando corresponda
------------	---------------------------------	---	---

3.3.2 Demanda Global

La demanda de tierras raras es considerada altamente inelástica debido a que los REE son insumos críticos para tecnologías estratégicas como motores de imanes permanentes, turbinas eólicas, electrónica de precisión y sistemas de defensa. Estos sectores no cuentan con sustitutos eficientes para elementos como Nd, Pr, Dy y Tb, lo que limita la respuesta del consumo frente a aumentos de precio (IRENA, 2022; Rasool et al., 2025).

Otra razón clave de la inelasticidad radica en que los REE representan una porción muy pequeña del valor total del producto final. Por ejemplo, el neodimio contenido en un vehículo eléctrico constituye menos del 2 % del costo final, pero es indispensable para motores de imanes permanentes de alta eficiencia (IEA, 2023; Market Review, 2024).

3.3.3 Oferta Global

La oferta de tierras raras es inelástica en el corto y mediano plazo debido a los largos ciclos de desarrollo minero, la complejidad de separación química y la concentración del refinado en China, que controla más del 85 % de la capacidad mundial (United States Geological Survey [USGS], 2025; African Development Bank, 2023).

El proceso productivo es intensivo en capital, ambientalmente regulado y técnicamente complejo, especialmente en la separación de elementos pesados como Dy y Tb, lo que limita la capacidad del mercado para responder rápidamente a aumentos de precio (MinMinería, 2022; Sernageomin, 2022).

Al coexistir oferta y demanda inelásticas, el mercado presenta una alta sensibilidad a shocks geopolíticos y regulatorios. Pequeñas variaciones en oferta —como cuotas chinas, restricciones de exportación o cierres de refinadoras— pueden disparar precios en magnitudes superiores al 100 % (IEA, 2023; African Development Bank, 2023).

Este comportamiento se observó en los ciclos de 2010–2011 y 2020–2022, donde la demanda tecnológica y políticas industriales generaron aumentos abruptos en los precios de Nd, Pr y Dy. Una estructura tan estrecha implica mercados volátiles y riesgos elevados para industrias dependientes (Argus Media, 2024; Rare Earth Market Intelligence Report, 2024).

3.4 Fijación de Precio

Las agencias especializadas como Argus Media, Asian Metal y SMM recopilan precios spot, ofertas firmes y datos de transacciones verificadas para publicar índices diarios, semanales y mensuales. Esto suple la falta de una bolsa REE y provee referencias de negociación para contratos globales (Argus Media, 2024; Zhang, 2025).

Estas agencias también elaboran análisis de mercado, proyecciones, reportes de riesgo geopolítico y evaluaciones de cadena de suministro utilizados por gobiernos, mineras, inversionistas y fabricantes tecnológicos (IEA, 2023; BID, 2025).

Las tierras raras se comercializan en distintas formas según el nivel de procesamiento y el destino industrial: (USGS, 2025; Argus Media, 2025; Fastmarkets, 2025).

- **Óxidos de tierras raras (REO):** principal forma de referencia en contratos (ej., NdPr-O , Dy_2O_3 , Tb_4O_7).
- **Carbonatos mixtos (MREC/MREC+):** intermedios que contienen mezclas de REE.
- **Metales individuales:** Nd, Pr, Dy, Tb, entre otros, usados para imanes y aleaciones.
- **Aleaciones:** especialmente NdFeB, base para imanes permanentes.
- **Imanes terminados:** etapa downstream, en algunos contratos vinculados al bill-of-materials de fabricantes.

La unidad de referencia más utilizada es el **\$/kg REO**. En particular:

- NdPr-O (mezcla de neodimio y praseodimio).
- Dy_2O_3 (óxido de disprosio).
- Tb_4O_7 (óxido de terbio).

Los compradores industriales suelen utilizar el promedio mensual o trimestral de índices como Argus Rare Earths, Asian Metal o Shanghai Metals Market (SMM) como base de referencia, aplicando ajustes por pureza, volumen, INCOTERMS y desempeño histórico del proveedor, de forma similar a otros mercados OTC de metales especiales (Zhang, 2025; Rare Earth Market Intelligence Report, 2024).

Cuando se transan metales o aleaciones, los precios suelen derivarse de la cotización del óxido equivalente, con la adición de una prima o la aplicación de un descuento según costos de conversión, pureza y logística. (Asian Metal, 2025; Fastmarkets, 2025).

En contratos de suministro se utilizan fórmulas del tipo:

$$P_{\text{metal}} = P_{\text{REO}} \times F_{\text{conv}} + C_{\text{proc}}$$

donde P_{metal} es el precio del metal entregado, P_{REO} el precio indexado del óxido, F_{conv} el factor de conversión estequiométrica y C_{proc} un término que agrupa costos de refinación, pérdidas y margen del refinador (Rasool et al., 2025; USGS, 2025).

El factor F_{conv} se calcula a partir de la relación de masas entre el metal y su óxido correspondiente, ajustado por el rendimiento metalúrgico real y la pureza contractual; por ejemplo, para Nd_2O_3 se considera la proporción de neodimio metálico contenido en el óxido y la eficiencia del proceso de reducción (Gronen et al., 2019; Minerals Information Institute, 2024).

Cuando se comercializan mezclas de óxidos magnéticos, como cestas Nd–Pr, las fórmulas incluyen ponderaciones por porcentaje de cada componente y coeficientes de calidad que reflejan el uso final en imanes permanentes, lo que incrementa la complejidad de la fijación de precios y la sensibilidad a cambios en la demanda específica de cada elemento (IEA, 2023; IRENA, 2022).

La determinación del precio en contratos bilaterales sigue habitualmente una fórmula indexada a PRAs. Una estructura típica es la siguiente:

Precio liquidable = Promedio mensual del índice PRA (p. ej., NdPr Oxide, FOB China) – IVA/VAT aplicable (si corresponde) – descuento por impurezas/humedad – fee de conversión (si el contrato liquida metal/aleación en lugar de óxido) ± ajuste logístico (FOB→CIF/EXW→FOB) ± prima por procedencia/ESG.

Notas: (i) las bases de precio (EXW/FOB/CIF) y divisa (USD/CNY) deben alinearse con los términos del contrato; (ii) la fórmula suele incluir redondeos, límites (*caps/floors*), y mecanismos de revisión por cambios metodológicos de la PRA.

Tabla 20. Productos comercializables de REE

Producto	Índice de referencia	Ajustes aplicados	Notas
NdPr óxido (FOB China)	Asian Metal NdPr oxide monthly avg	– VAT chino, – impurezas, ± flete CIF	Caso MP Materials–Shenghe (SEC, 2020, 2025)
Dy ₂ O ₃ (óxido)	Fastmarkets Dy ₂ O ₃ FOB China	– VAT, – fees de conversión (metal), ± prima ex-China	Usado en contratos con fabricantes de imanes
MREC (carbonato mixto)	Argus MREC EXW China	– humedad, – penalidades de radionúclidos	Etapas tempranas de la cadena, contratos con traders
NdFeB metal alloy	Precio NdPr óxido (Asian Metal/Fastmarkets) + fee conversión	± logística FOB→CIF, ± prima ESG	Precio derivado del óxido con recargos industriales

Los organismos públicos, incluidos bancos multilaterales, ministerios de minería y servicios geológicos, utilizan series históricas de estas agencias combinadas con estadísticas de producción y comercio para construir modelos de oferta–demanda y realizar proyecciones de precio en escenarios de transición energética (IEA, 2023; BID, 2025; Sernageomin, 2022; Cochilco, 2023).

Entre los factores estructurales que influyen en la fijación de precios se encuentran la política de cuotas y regulación ambiental de China, el crecimiento de la demanda de imanes permanentes para vehículos eléctricos y turbinas eólicas, la entrada gradual de nuevos proyectos fuera de China y la evolución de tecnologías de reciclaje y sustitución, como se muestra en la Tabla 20 (IEA, 2023; IRENA, 2022; ERIA, 2025).

Informes de organismos multilaterales destacan que la concentración de la capacidad de refinación y fabricación de imanes en un pequeño número de países amplifica la sensibilidad de los precios a shocks localizados, aumentando el riesgo de episodios de escasez relativa y picos de precio en magnet REE como

Nd, Pr, Dy y Tb, como se presentan en la Tabla 21 (BID, 2025; African Development Bank, 2023).

Tabla 21. Precios estimados según concentración de óxidos de tierras raras.

Óxido / mezcla / metal	Precio estimado	Unidad / formato / observaciones	Fuente / fecha
Óxido Neodimio-Praseodimio (NdPr oxide, mezcla)	≈ 76.04 USD/kg	óxido mezcla (Nd+Pr), mercado China 2025-11-03 (MacroMicro)	3 Nov 2025
Óxido PrNd (Pr ₆ O ₁₁ 25% + Nd ₂ O ₃ 75%)	≈ 78,281 USD/tonelada → ≈ 78.3 USD/kg	EXW China, 2025-09-16 (ScrapMonster)	16 Sep 2025
Óxido Disprosio (Dy ₂ O ₃), alta pureza	≈ 185.5–190.5 USD/kg	“High-purity” óxido, datos 14 Nov 2025 (metal.com)	14 Nov 2025
Óxido Terbio (Tb ₂ O ₃), alta pureza	≈ 816.6–821.5 USD/kg	“High-purity” óxido, 14 Nov 2025 (metal.com)	14 Nov 2025
Óxido Escandio (Sc ₂ O ₃)	≈ 597.5–622.4 USD/kg	“High-purity” óxido, 14 Nov 2025 (metal.com)	14 Nov 2025
Óxido Lantano (La ₂ O ₃) — baja pureza / mercado general	≈ 2 116–2 241 USD/tonelada → ≈ 2.1–2.2 USD/kg	“High-purity” óxido, 14 Nov 2025 (metal.com)	14 Nov 2025
Óxido Cerio (CeO ₂) — mercado general	≈ 1 394–1 494 USD/tonelada → ≈ 1.4–1.5 USD/kg	óxido “commodity”, 14 Nov 2025 (metal.com)	14 Nov 2025

En el contexto chileno, documentos de MinMinería, Cochilco y Sernageomin subrayan que el desarrollo de proyectos de minerales críticos y la incorporación de tierras raras en la estrategia minera nacional podrían contribuir a diversificar la oferta global y a mejorar la resiliencia de las cadenas de valor frente a la volatilidad de precios internacionales (MinMinería, 2022; Sernageomin, 2022; Cochilco, 2023).

3.4.1 Volatilidad de los Precios de REE

Los precios de REE han mostrado históricamente una volatilidad superior a la de muchos otros metales, con episodios de fuertes alzas seguidos de correcciones abruptas, asociados a cambios regulatorios en China, disputas comerciales internacionales y variaciones bruscas en la demanda tecnológica (IEA, 2023; African Development Bank, 2023).

Casos emblemáticos incluyen el fuerte repunte de precios en 2010–2011 y las alzas vinculadas a la expansión de la electromovilidad y la energía eólica entre 2020 y 2022, donde óxidos como Nd₂O₃ y Dy₂O₃ multiplicaron su valor en períodos relativamente cortos antes de estabilizarse a niveles intermedios (Cochilco, 2023; MinMinería, 2022).

En el corto plazo, las fluctuaciones diarias tienden a situarse en rangos de pocos puntos porcentuales, pero en horizontes anuales pueden producirse variaciones superiores al 50–100 %, lo que requiere contratos flexibles, diversificación de origen del suministro y estrategias de gestión de riesgo de precio por parte de los consumidores industriales (Argus Media, 2024; Rare Earth Future Contract Strategy, 2025).

La volatilidad de los precios de los óxidos de tierras raras (REO) constituye uno de los principales desafíos para el desarrollo sostenible de la cadena de suministro mundial. Según Gupta, Williams y Gaustad (2023), esta volatilidad se asocia principalmente a la limitada disponibilidad de recursos secundarios y al tiempo prolongado requerido para poner en marcha nuevas operaciones mineras. Los autores destacan que la transición hacia fuentes secundarias, como el reciclaje de imanes permanentes o la recuperación de residuos industriales, avanza más lentamente que el crecimiento de la demanda tecnológica global, lo que genera desequilibrios estructurales en el mercado (Gupta et al., 2023).

Como sostienen Gielen y Lyons (2022), las restricciones comerciales y las políticas de exportación diferenciales han amplificado las fluctuaciones de precios, especialmente en elementos críticos como el disprosio (Dy) y el terbio (Tb), esenciales para la fabricación de imanes de alto rendimiento. En este contexto, la dependencia de pocos proveedores crea un entorno de vulnerabilidad sistémica donde los precios tienden a reaccionar de manera exagerada ante perturbaciones externas.

El limitado avance de la minería secundaria, los largos tiempos de desarrollo de proyectos, la concentración geográfica de la producción y la creciente presión de la demanda energética conforman un escenario complejo donde la estabilidad de precios solo podrá alcanzarse mediante políticas coordinadas de inversión, innovación tecnológica y cooperación internacional (Gupta et al., 2023; IRENA, 2022; USGS, 2025; Rainbow Rare Earths, 2024).

El efecto de “demanda inelástica” señalado por Gupta et al. (2023) se traduce en picos de precios difíciles de corregir en el corto plazo, lo que incentiva la especulación y la acumulación estratégica de inventarios por parte de los fabricantes (IRENA, 2022; Rainbow Rare Earths, 2024).

3.4.2 Modelos de proyección económica

El análisis y proyección de precios en el mercado de óxidos de tierras raras (REO) es un componente esencial para la planificación estratégica de inversiones mineras, políticas energéticas y desarrollo tecnológico. En estudios económicos, las proyecciones permiten construir escenarios de inversión, estimar flujos de caja, evaluar riesgos y determinar la viabilidad económica de proyectos extractivos, especialmente en contextos de transición energética acelerada (International Energy Agency [IEA], 2023; Cochilco, 2023).

Dado el carácter volátil del mercado, marcado por la concentración geográfica de la producción y la dependencia de la demanda tecnológica, los investigadores han desarrollado modelos econométricos que permiten estimar el comportamiento futuro de los precios con mayor precisión (Gupta, Williams, & Gaustad, 2023).

Entre los enfoques más relevantes se encuentran: el modelo de reversión a la media (“mean reversion”), el modelo de canasta o “basket price” y los escenarios de transición energética

definidos por la USGS (2025), los cuales integran proyecciones bajo distintos supuestos de desarrollo económico y tecnológico (IRENA, 2022; Rainbow Rare Earths, 2024).

3.4.2.1 Modelo de reversión a la media (Mean Reversion)

El modelo de reversión a la media se basa en la premisa de que, tras periodos de alta volatilidad, los precios tienden a retornar hacia un valor de equilibrio determinado por los fundamentos del mercado (Gupta et al., 2023). Este comportamiento se observa en los mercados de commodities estratégicos donde la oferta responde lentamente a los cambios en la demanda. En el caso de las tierras raras, la reversión a la media refleja la tendencia de los precios a estabilizarse

una vez que las condiciones de escasez o sobreoferta son absorbidas por el mercado (Ebrahimi, 2023; Kalvig, 2022).

Matemáticamente sigue un proceso estocástico de Ornstein–Uhlenbeck:

$$dP = \theta(\mu - P)dt + \sigma dW$$

donde μ es el precio de largo plazo. En REE se utiliza ampliamente debido a la fuerte intervención estatal china y ciclos de sobre–subproducción (Gronen et al., 2019; IEA, 2023).

Gupta, Williams y Gaustad (2023) aplicaron este modelo a series de precios de óxidos de neodimio (Nd_2O_3), disprosio (Dy_2O_3) y terbio (Tb_4O_7) para el período 2000–2023, demostrando que la volatilidad es autocorrelacionada y que los shocks de oferta inducidos por políticas chinas de exportación generan desviaciones temporales. El parámetro clave de este modelo es la velocidad de ajuste (κ), que indica la rapidez con que el precio retorna a su valor medio de largo plazo. Valores de κ entre 0.2 y 0.4 sugieren una recuperación gradual en horizontes de cinco a diez años (Gupta et al., 2023; USGS, 2025).

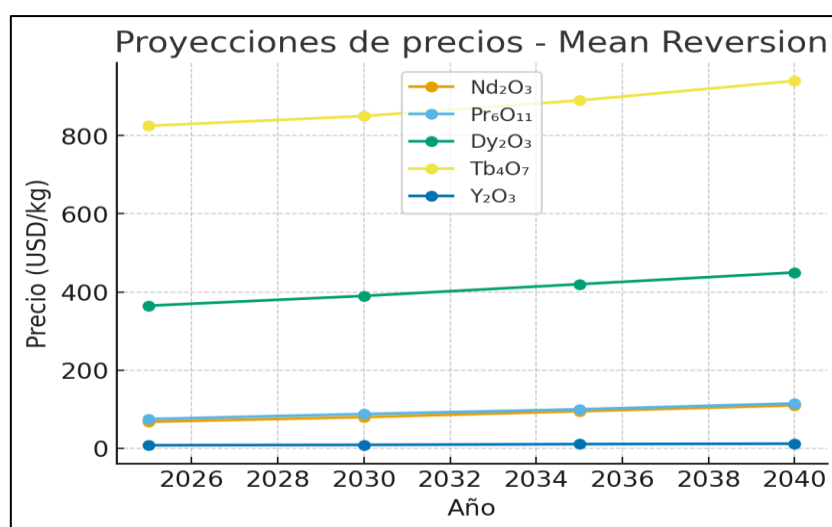


Figura 5. Gráfico Proyecciones de precios- Mean Reversion
Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Proyecciones de precios según Mean Reversion

Óxido	2025 (USD/kg)	2030 (USD/kg)	2035 (USD/kg)	2040 (USD/kg)
Nd ₂ O ₃	68	80	95	110
Pr ₆ O ₁₁	75	88	100	115
Dy ₂ O ₃	365	390	420	450
Tb ₄ O ₇	825	850	890	940
Y ₂ O ₃	8	9	11	12

En minería, este modelo se usa en evaluaciones económicas cuando se espera que picos de precios –como los de Nd y Dy en 2011 y 2021– no sean sostenibles en el largo plazo. Contribuye a estimar precios conservadores para proyectos mineros, reduciendo el riesgo de sobre–estimación, como se puede obser en Tabla 22 y Figura 5 (Cochilco, 2023; MinMinería, 2022).

3.4.2.2 Modelo de canasta o Basket Price

El modelo de canasta (“basket price”) pondera el valor total de un concentrado de REO según la proporción de cada elemento en la mezcla. Esta metodología es utilizada por la industria minera para estimar la rentabilidad de depósitos polimetálicos, especialmente en proyectos de arcillas iónicas donde los porcentajes de neodimio, praseodimio y disprosio determinan el valor final del producto (IRENA, 2022).

Matemáticamente, el valor total (V_t) de la canasta se calcula como:

$$V_t = \sum (P_i \times W_i)$$

donde P_i representa el precio unitario del óxido i y W_i su fracción en peso.

Este enfoque permite proyectar ingresos esperados en función de la composición mineralógica del depósito (Rainbow Rare Earths, 2024). La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2022) y el USGS (2025) han aplicado este modelo para estimar el valor promedio de concentrados de REO en proyectos de África y Sudamérica, observando que el peso relativo de los óxidos magnéticos (Nd-Pr-Dy-Tb) puede representar hasta el 85% del valor total de un concentrado. Este modelo es esencial en evaluaciones económicas preliminares (PEA) como la realizada por Ausenco (2021) para el proyecto Penco Module en Chile, donde la composición promedio de REE influye directamente en los ingresos proyectados (Del Valle et al., 2021).

En minería chilena y mundial, este modelo se usa para determinar ingresos proyectados por tonelada de mineral y comparar escenarios de composición y recuperación metalúrgica. Es ampliamente aplicado en estudios técnicos de Biolantánidos y proyectos australianos como Mt Weld y Nolans (Cochilco, 2023; Market Review, 2024).

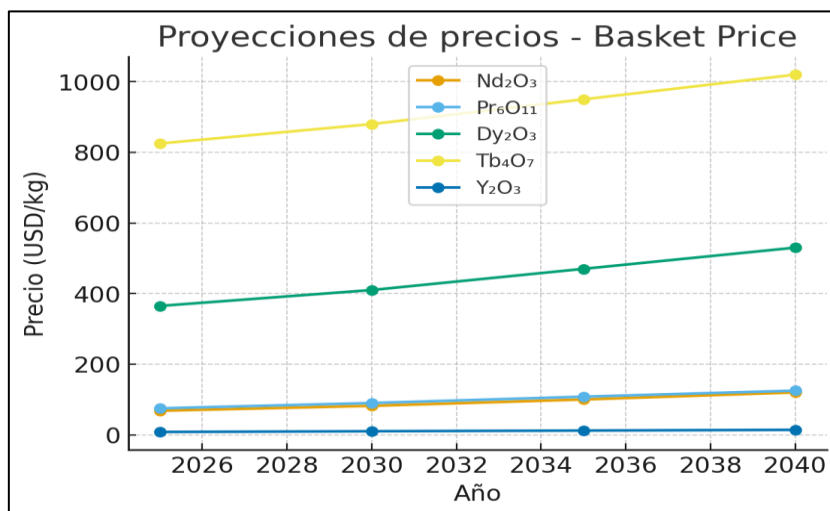


Figura 6. Gráfico proyecciones de precio - Basket Price
Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Proyecciones de precios según Basket Price

Óxido	2025 (USD/kg)	2030 (USD/kg)	2035 (USD/kg)	2040 (USD/kg)
Nd ₂ O ₃	68	82	100	120
Pr ₆ O ₁₁	75	90	108	125
Dy ₂ O ₃	365	410	470	530
Tb ₄ O ₇	825	880	950	1020
Y ₂ O ₃	8	10	12	14

Escenarios de transición energética (USGS, 2025)

El U.S. Geological Survey (USGS, 2025) plantea tres escenarios prospectivos para el mercado de tierras raras: base, transición y acelerado. El escenario base considera un crecimiento lineal moderado de la demanda, con precios estables y expansión limitada de la producción.

El escenario de transición proyecta un aumento sostenido de los precios debido a la expansión de la electromovilidad y la energía eólica, mientras que el escenario acelerado contempla un incremento del 30–40% en la demanda global de REO hacia 2040 (Gielen & Lyons, 2022; IEA, 2023).

En el escenario acelerado, el consumo de óxidos de neodimio y disprosio podría duplicarse respecto a los niveles de 2025, impulsado por la producción masiva de vehículos eléctricos (IRENA, 2022). Los precios, como se muestran en Figura 7 y en la Tabla 24, tenderían a incrementarse en proporción al desequilibrio entre oferta y demanda, reflejando la inelasticidad de la producción minera y la concentración del refinado en China (Kavvig, 2022; Rainbow Rare Earths, 2024). Por tanto, los modelos del USGS permiten evaluar la sensibilidad del mercado ante cambios estructurales en el sistema energético global (USGS, 2025).

Estos escenarios se sustentan en curvas S de adopción tecnológica, modelos de electrificación vehicular y metas de capacidad eólica global. Son fundamentales para la planificación minera y decisiones de política pública respecto a minerales críticos (IRENA, 2022; BID, 2025).

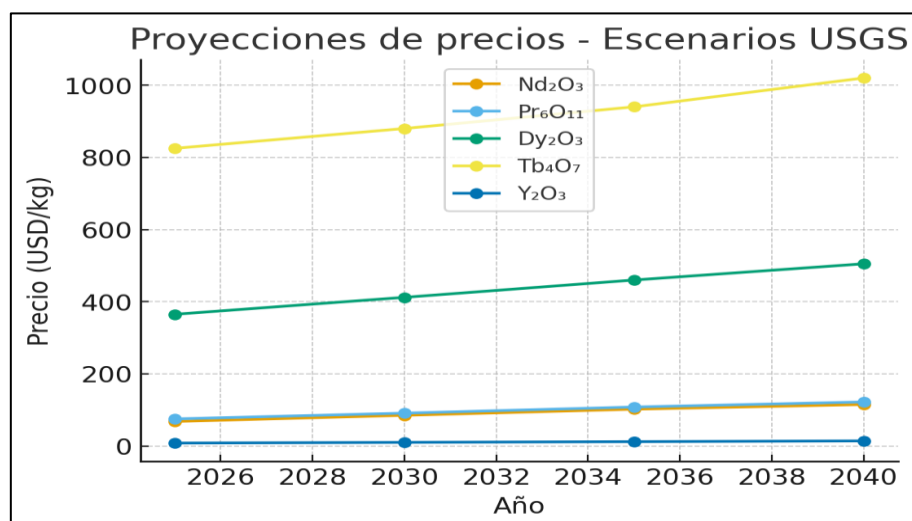


Figura 7. Gráfico proyecciones de precios - Escenarios USGS.

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Proyecciones de precios según Escenarios USGS

Óxido	2025 (USD/kg)	2030 (USD/kg)	2035 (USD/kg)	2040 (USD/kg)
Nd ₂ O ₃	68	85	102	115
Pr ₆ O ₁₁	75	91	108	122
Dy ₂ O ₃	365	412	460	505
Tb ₄ O ₇	825	880	940	1020
Y ₂ O ₃	8	10	12	14

Los tres modelos presentados constituyen herramientas complementarias para el análisis de precios de REO. El modelo de reversión a la media explica la estabilidad de largo plazo tras periodos de volatilidad, el modelo de canasta permite valorar económicamente los concentrados según su composición y los escenarios USGS incorporan variables tecnológicas y de política energética. En conjunto, estos enfoques proporcionan una base sólida para la evaluación económica de proyectos de tierras raras y la formulación de políticas de suministro sostenible (Gupta et al., 2023; IRENA, 2022; USGS, 2025).

3.5 Mercado de MREC como producto intermedio

El Mixed Rare Earth Carbonate (MREC) es un concentrado químico intermedio constituido por un carbonato mixto de lantánidos, típicamente expresado como $\text{REE}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, obtenido tras la lixiviación, purificación y precipitación de los elementos de tierras raras contenidos en minerales o residuos mineros (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022). A diferencia de un concentrado físico (por ejemplo, un concentrado Cu–Au), el MREC corresponde a un producto químico donde la fase portadora de las REE es un carbonato hidratado, con contenidos usuales de 40–60 % en TREO (Total Rare Earth Oxides), dependiendo del proyecto y del grado de purificación alcanzado (USGS, 2024).

3.5.1 Demanda mundial de MREC

La demanda mundial de MREC está directamente ligada al crecimiento del mercado de imanes permanentes NdFeB, proyectado a incrementarse 50–60% hacia 2040 según escenarios de transición energética (IEA, 2025). El mercado

del MREC se encuentra dominado por China, pero se observan aumentos de importaciones en Japón, India y la Unión Europea debido a políticas de diversificación de suministro.

Estudios de mercado estiman que el valor global del mercado MREC alcanzará los 10.300 millones USD en 2025, impulsado por una demanda estable e inelástica asociada a las industrias de electromovilidad y energía eólica (MarketWatch, 2024).

La demanda de MREC se considera relativamente inelástica en el corto plazo porque la función que cumplen las REE magnéticas en los sistemas tecnológicos no tiene sustitutos directos equivalentes a gran escala: los imanes ferríticos o de SmCo presentan densidades de energía magnética muy inferiores y, por tanto, no resultan competitivos en aplicaciones de alta densidad de potencia como vehículos eléctricos o aerogeneradores compactos (Ghorbani, 2025; IRENA, 2022). Además, el costo de las REE representa una fracción relativamente pequeña del costo total de un automóvil eléctrico o de una turbina eólica, de manera que variaciones significativas en el precio del MREC se traducen en cambios marginales en el costo final del sistema (IEA, 2021; World Bank, 2020).

Esta estructura genera una demanda derivada con baja elasticidad-precio: aun cuando el precio del MREC se incremente de forma relevante en escenarios de tensión de oferta, los compradores finales (fabricantes de imanes y OEM de automoción o energía) tienen fuertes incentivos a asegurar suministro por razones de desempeño tecnológico y compromiso regulatorio en materia de descarbonización, aceptando una mayor volatilidad de precios a cambio de confiabilidad y trazabilidad de la cadena (IEA, 2024; European Commission, 2023; Germany Ministry for Economic Affairs and Climate Action, 2025).

Japón, India y la Unión Europea han identificado explícitamente el riesgo estratégico de depender casi totalmente de China para el suministro de REE, intermedios como MREC e imanes permanentes terminados (European Commission, 2023; OECD, 2023; World Economic Forum, 2025). Japón ha impulsado durante más de una década proyectos de offtake y coinversión en yacimientos de REE en Australia, Vietnam e India, así como en capacidades de reciclaje de imanes NdFeB, con el objetivo de diversificar el origen de sus materias primas críticas (METI Japan, 2022; JOGMEC, 2023).

India, por su parte, acaba de aprobar un programa de aproximadamente 816 millones de dólares para desarrollar capacidad de fabricación doméstica de imanes permanentes de tierras raras, buscando reducir su dependencia de importaciones que en el año fiscal 2024–2025 alcanzaron casi 54.000 t de imanes (Reuters, 2025; India Ministry of Commerce, 2025). Dado que estas políticas apuntan a aumentar la capacidad interna de magnet manufacturing, se proyecta un crecimiento correlativo en la demanda india de MREC y otros intermedios de REE que alimenten sus futuras plantas de separación y aleación (Adamas Intelligence, 2024; IEA, 2025).

En la Unión Europea, el Critical Raw Materials Act establece objetivos para reducir la dependencia de un solo proveedor por debajo del 65 % de consumo para cada materia prima crítica, incluyendo las tierras raras magnéticas (European Commission, 2023). Esto ha impulsado iniciativas como la planta de imanes de Neo Performance Materials en Estonia y programas de apoyo a proyectos de REE en África, Australia y la propia Europa, lo que se traduce en un creciente interés por firmar contratos de suministro de MREC con productores no chinos (Financial Times, 2025; Germany BMWK, 2025; LKAB, 2021).

3.5.2 Oferta mundial de MREC

La oferta mundial de MREC se concentra en productores como China, África Australia y algunos países europeos que trabajan con relaves de fosfatos o hierro (USGS, 2025). China refina más del 90% del MREC global y mantiene una alta capacidad de procesamiento de carbonatos complejos.

África emergió como un polo de nuevos productores gracias a proyectos como Longonjo, Monte Muambe y Phalaborwa, los cuales aprovechan depósitos superficiales o relaves para producir MREC a costos competitivos (Altona Rare Earths, 2023).

A corto plazo, la oferta de MREC es moderadamente elástica, ya que puede expandirse mediante nuevos proyectos basados en relaves, en contraste con la limitada expansión de plantas de separación completa.

Las estimaciones de tamaño de mercado para el MREC presentan cierta dispersión dependiendo de la metodología empleada y del grado en que se incluye o no a otros concentrados comerciales de REE dentro de la misma categoría. Algunos informes de consultoras especializadas sitúan el valor del mercado global de MREC en torno a 4,2 mil millones USD en 2023, con tasas de crecimiento de 6–7 % anual hasta 2031 (WiseGuyReports, 2024; MarketSize&Trends, 2025). Otros análisis, de corte más agresivo, señalan un valor cercano a 10,3 mil millones USD para 2025 y un CAGR de 12,3 % para el período 2026–2033, asociado a la rápida expansión de aplicaciones industriales y tecnológicas basadas en REE (LinkedIn Market Brief, 2025; MarketWatch, 2024).

En todos los casos, la narrativa subyacente coincide: el mercado de MREC se expande de forma sostenida en la medida que se diversifica la oferta fuera de China, entran en producción proyectos como Longonjo, Monte Muambe y Phalaborwa, y se desarrollan nuevos hubs de separación en Europa, Norteamérica e India (Altona Rare Earths, 2023; Rainbow Rare Earths, 2024; Pensana, 2023). La combinación de un crecimiento fuerte de la demanda final de imanes NdFeB con una expansión relativamente más lenta de la capacidad de separación refuerza la percepción de que el MREC seguirá siendo un insumo con fundamentos de precio robustos en el mediano plazo (IEA, 2024; OECD, 2023; World Bank, 2020).

3.5.2.1 Comercialización de MREC

Datos de Shanghai Metals Market (SMM) y otros proveedores de inteligencia de mercado muestran que entre enero y abril de 2025 China importó 3.412 t de MREC, un aumento interanual de aproximadamente 30 %, con volúmenes mensuales que superan las 1.100 t en algunos meses (SMM, 2025; Baiinfo, 2025). Estas importaciones provienen principalmente de Malasia, Brasil y otros países productores, y reflejan que parte de la demanda de MREC de las plantas chinas se satisface mediante contratos de offtake con proyectos en África y Sudamérica (Rainbow Rare Earths, 2024; Altona Rare Earths, 2023; Pensana, 2023).

3.5.3 Formación de Precio

Para productos de tipo carbonato mixto con contenidos de 40–45 % TREO, los precios reportados para RE carbonate en plazas chinas se sitúan en el orden de 5.5–6.5 USD/kg MREC (equivalente a 12–15 USD/kg TREO contenido) según reportes de precios de concentrados de tierras raras de proveedores asiáticos y bases de datos de precios de carbonatos de REE (USGS, 2024; Metal.com, 2025). En el caso de concentrados de mayor grado o con fracciones elevadas de NdPr (por ejemplo, algunos proyectos de arcillas iónicas en Australia y Brasil), la valoración implícita de la canasta puede superar los 80–120 USD/kg de MREC cuando el contenido TREO y la proporción de NdPr son significativamente superiores a los de un depósito típico de apatita (Victory Metals, 2023; Makuutu DFS, 2022).

En la práctica, el precio efectivo del MREC resulta de la negociación entre el productor de concentrado y el operador de la planta de separación, incorporando descuentos por impurezas (Fe, Ca, P, Th, U), variabilidad en la calidad y condiciones logísticas. Modelos utilizados en estudios económicos de Mountain Pass y proyectos de arcillas iónicas, como Makuutu o Penco, suponen precios del orden de 8–12 USD/kg de contenido REO para mixed rare earth concentrate, ajustados a la canasta de óxidos y al benchmark de NdPr (Mountain Pass TR, 2024; EX-96.1 SEC, 2022; Aclara Resources, 2021).

Para efectos de modelación económica, el valor del MREC producido desde relaves férricos chilenos puede estimarse a partir de un enfoque de "precio canasta" (basket price), en el cual el precio promedio ponderado se calcula como la suma del producto entre el precio de cada óxido REE y su fracción másica en el TREO total. Esto es consistente con los enfoques adoptados en proyectos internacionales de REE como Mountain Pass, Makuutu, Nolans y Penco (Mountain Pass TR, 2024; Arafura, 2021; Aclara Resources, 2021; O'Brien & Alonso, 2024).

La expresión general es:

$$\text{Precio}_{\text{canasta}} = \sum (\text{Precio}_i \times \text{Fracción}_{\text{REO},i})$$

En relaves férricos de tipo apatita, los estudios de distribución de REE indican proporciones típicas del orden de 35–45 % CeO_2 , 25–35 % La_2O_3 , 15–22 % Nd_2O_3 , 2–4 % Pr_6O_{11} y 1–5 % $\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Gd}_2\text{O}_3$ dentro del TREO total (Wei et al.,

2022; Jin et al., 2025; MinMinería, 2022). Al combinar estas fracciones con precios acelerados de óxidos magnéticos (Nd_2O_3 y Pr_6O_{11}) en el rango 150–260 y 160–280 USD/kg respectivamente, y precios bajos para La_2O_3 y CeO_2 (3–7 USD/kg), se obtienen precios de canasta para proyectos tipo apatita en el rango 45–55 USD/kg TREO, coherentes con análisis de escenarios de transición energética acelerada (IRENA, 2022; IEA, 2023; Adamas Intelligence, 2023).

La Tabla 1 resume rangos de precios de óxidos relevantes para el cálculo del precio canasta en un escenario acelerado:

Óxido REE	Rango de precio acelerado (USD/kg)	Referencias
Nd_2O_3	150–260	IRENA (2022); Adamas (2023); USGS (2024)
Pr_6O_{11}	160–280	IEA (2023); Roskill (2022)
La_2O_3	5–7	USGS (2024); MinMinería (2022)
CeO_2	3–5	USGS (2024); OECD (2021)
Sm_2O_3	12–20	IRENA (2022); Stratfor (2024)
Gd_2O_3	40–70	USGS (2024); WoodMac (2022)

Proyecciones de precio del MREC

Las proyecciones de precio del carbonato mixto de tierras raras (Mixed Rare Earth Carbonate, MREC) constituyen un insumo crítico para la evaluación económica de proyectos de tierras raras, especialmente cuando éstos se basan en recursos no convencionales como relaves férricos o arcillas de adsorción iónica (Hajdu-Rahkama et al., 2025; SERNAGEOMIN, 2020).

En la literatura y en los estudios económicos de proyectos, se observan tres grandes enfoques para proyectar el precio del MREC:

Modelo 1: Proyecciones basadas en estudios PEA

El primer enfoque de proyección de precios se deriva de estudios de evaluación económica preliminar (PEA) o prefactibilidad de proyectos específicos de tierras raras que contemplan la producción de MREC como producto final o intermedio (Altona Rare Earths, 2023; Rainbow Rare Earths, 2024). En estos estudios, el precio del MREC se obtiene, en general, calculando el valor de una canasta de óxidos de tierras raras ponderada por la composición química proyectada del MREC (porcentaje de Nd_2O_3 , Pr_6O_{11} , Dy_2O_3 , Tb_4O_7 , entre otros) y aplicando un descuento para reflejar las impurezas residuales y los costos de separación posteriores en plantas de refinación (UNCTAD, 2014; Zhang et al., 2021).

Un ejemplo representativo es el proyecto Monte Muambe en Mozambique, donde el estudio PEA considera un precio base de 13.558 USD/t para el MREC, con un tenor típico de 45–50 % de TREO (Total Rare Earth Oxides) y una distribución interna fuertemente ponderada a Nd-Pr (Altona Rare Earths, 2023, 2025). Este valor se obtiene a partir de precios de referencia de óxidos de Nd, Pr, Dy y Tb reportados por consultoras de mercado y ajustar el valor a un

producto intermedio, de modo que el MREC retenga suficiente margen para que el refinador capture valor en la etapa de separación (Adamas Intelligence, 2023; MarketWatch, 2024).

En este tipo de estudios, el precio de 13.558 USD/t se utiliza como escenario base, acompañado de sensibilidades típicas de $\pm 20\text{--}30\%$ para evaluar la robustez del VAN (Valor Actual Neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno) frente a fluctuaciones de mercado (Altona Rare Earths, 2023; World Bank, 2020). De esta manera, los modelos PEA proporcionan un ancla cuantitativa inicial que se ajusta posteriormente mediante análisis de sensibilidad y escenarios de precios altos y bajos, pero siempre partiendo de la lógica de canasta de óxidos como driver fundamental (IEA, 2021; UNCTAD, 2014).

Modelo 2: Proyecciones de mercado (CAGR 6–7 %)

El segundo enfoque consiste en utilizar proyecciones de mercado que estiman el tamaño del mercado global del MREC, tanto en términos de valor (millones de USD) como de volumen (t/año), y su tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) para horizontes típicos de 5 a 10 años (MarketWatch, 2024; WiseGuyReports, 2024). Estos estudios agrupan la oferta potencial de MREC y otros carbonatos mixtos de tierras raras, proyectan la expansión de proyectos en África, Asia y Europa, y consideran la demanda esperada de plantas de separación en China, Japón, India, Europa y Norteamérica (OECD, 2023; European Commission, 2023).

Diversos informes sitúan el valor del mercado de MREC en aproximadamente 4,2 mil millones USD en 2023, con una CAGR estimada de 6–7 % hasta 2031, mientras que análisis más expansivos señalan un mercado cercano a 10,3 mil millones USD en 2025 con CAGRs de 12,3 % para 2026–2033 (MarketWatch, 2024; MarketSize&Trends, 2025; LinkedIn Market Brief, 2025). Tras armonizar estos valores y asumir un rango de crecimiento conservador de 6–7 %, se puede derivar una trayectoria de precios promedio por tonelada de MREC, suponiendo que el volumen de toneladas comercializadas se incrementa de forma relativamente estable con la entrada de nuevos proyectos como Longonjo, Monte Muambe y Phalaborwa (Altona Rare Earths, 2023; Rainbow Rare Earths, 2024; Pensana, 2023).

Si se toma como referencia un precio base de alrededor de 13.500–14.700 USD/t en el entorno de 2023–2025, y se aplica un crecimiento compuesto anual de 6–7 %, se obtienen precios proyectados hacia 2030 del orden de 18.000–22.000 USD/t, asumiendo estabilidad en la relación entre valor de mercado, volumen transado y valor relativo de los óxidos componentes (MarketWatch, 2024; WiseGuyReports, 2024). Esta metodología es particularmente útil para análisis de sensibilidad de proyectos, ya que permite explorar cómo cambios en la CAGR asumida afectan el valor económico sin requerir modelación detallada de cada óxido individual (OECD, 2023; World Bank, 2020).

Modelo 3: Escenarios energéticos (CAGR 9–10 % vinculados a REE magnéticas)

El tercer enfoque para proyectar precios de MREC se basa en modelos energéticos que vinculan directamente la evolución de precios con los escenarios de demanda futura de tierras raras magnéticas y de imanes permanentes NdFeB en el contexto de la transición energética (IEA, 2021, 2024, 2025; IRENA, 2022). Estos modelos parten de proyecciones de penetración de vehículos eléctricos, despliegue de energía eólica onshore y offshore y crecimiento de otras aplicaciones intensivas en imanes, como robótica y electrónica de potencia, para estimar el consumo futuro de Nd, Pr, Dy y Tb (Adamas Intelligence, 2023; Ghorbani, 2025).

La IEA y otros organismos señalan que, en escenarios de neutralidad de carbono o de transición acelerada, la demanda de REE magnéticas puede crecer significativamente más rápido que en escenarios de políticas actuales, lo que se traduce en CAGRs estimadas en el rango de 9–10 % para el valor del mercado de imanes NdFeB y, por extensión, para los óxidos magnéticos y el MREC como insumo intermedio (IEA, 2024; Adamas Intelligence, 2024; World Bank, 2020). En estos escenarios, la oferta de nuevos proyectos de MREC y óxidos podría no expandirse con la misma rapidez, generando tensiones de mercado que impulsan los precios a tasas superiores a las observadas en el pasado (USGS, 2025; OECD, 2023).

Si se adopta un escenario de transición acelerada en el que el precio de MREC crece a un CAGR de 9–10 % a partir de un valor base cercano a 14.700 USD/t en 2025, los modelos arrojan precios en el rango de 25.000–28.000 USD/t hacia 2030 y valores cercanos a 60.000–73.000 USD/t hacia 2040, suponiendo que no se produce una sobreoferta que modere las tensiones de precios (IEA, 2024; Adamas Intelligence, 2024; LinkedIn Market Brief, 2025). Estos ejercicios no son predicciones puntuales, sino escenarios de estrés que muestran la sensibilidad de los proyectos a un contexto de fuerte crecimiento de la demanda de REE magnéticas, donde el MREC actúa como cuello de botella de la cadena de suministro (IEA, 2025; European Commission, 2023).

3.6 Importancia Estratégica

Según la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2022), la demanda de REE se triplicará hacia 2040 impulsada por la electromovilidad y las energías renovables. Cada vehículo eléctrico puede requerir entre 1 y 2 kilogramos de neodimio y disprosio para sus motores, mientras que una turbina eólica de 3 MW puede contener hasta 600 kg de óxidos de tierras raras (Rainbow Rare Earths, 2024). Estos materiales son insustituibles en muchas aplicaciones industriales, lo que los convierte en recursos estratégicos para cumplir los objetivos del Acuerdo de París (Kalgig, 2022). De acuerdo con la International Energy Agency (IEA, 2023), los REE también son esenciales para tecnologías emergentes de almacenamiento energético, hidrógeno verde y redes inteligentes. Su papel en baterías, sensores y catalizadores de alta selectividad fortalece la eficiencia de conversión energética y la reducción de emisiones industriales. Sin embargo, la concentración de la refinación en Asia, especialmente en China, plantea riesgos

de suministro a nivel global (IRENA, 2022; USGS, 2025). Ante ello, regiones como la Unión Europea, Estados Unidos y América Latina han diseñado estrategias para diversificar la producción y fomentar la minería sostenible.

La dependencia con China genera vulnerabilidad en la cadena de suministro, ya que las restricciones de exportación y las tensiones comerciales pueden provocar interrupciones y volatilidad en los precios (Gupta, Williams, & Gaustad, 2023). La limitada capacidad de reciclaje y los largos plazos de desarrollo de nuevos proyectos reducen la elasticidad de la oferta, dificultando la estabilización del mercado ante aumentos de la demanda (Gielen & Lyons, 2022).

3.7 Proyectos Actuales En Chile

Los prospectos de Sierra Áspera y Cerro Carmen corresponden a depósitos del tipo IOCG/IOA (Iron Oxide Copper Gold/ Iron Oxide Apatite) ubicados en la Cordillera de la Costa, en la Región de Atacama, con un historial de estudios realizados por ENAMI y CCHEN, además de trabajos de laboratorio y pruebas piloto orientados a la recuperación de tierras raras. Por su parte, Botaderos Isidora constituye un ejemplo de minería secundaria a partir de botaderos y relaves en la Región de Antofagasta, alineado con iniciativas de economía circular y valorización de residuos. Finalmente, el proyecto Biolantánidos, ubicado en Penco, destaca como el caso más avanzado hacia la producción, basado en arcillas iónicas y en un esquema hidrometalúrgico caracterizado por una huella ambiental comparativamente baja. En la Tabla 25, se resumen los principales proyectos actuales según ubicación y compañía minera.

Tabla 25. Proyectos actuales en Chile de REE.

Proyecto	Compañía / Titular	Región / Comuna	Tipo de Mena / Origen	Estado
Sierra Áspera	ENAMI / CCHEN	Atacama / Diego de Almagro	IOCG/IOA con apatita (REE en apatita/monacita/allanita)	Prospecto / exploración histórica
Botaderos Isidora	APM Ltda.	Antofagasta / (botaderos)	Botaderos/relaves con potencial REE y elementos críticos	Exploración (minería secundaria)
Cerro Carmen	ENAMI / CCHEN	Atacama / Diego de Almagro	U-REE en entorno IOCG-Costa (monacita/allanita/xenotima)	Prospecto con ensayos piloto
Biolantánidos (Módulo Penco)	Aclara Resources	Biobío / Penco	Arcillas adsorbidas de iones (IAC), HREE (Dy, Tb) y NdPr	Desarrollo / tramitación ambiental (módulo)

I. Sierra Áspera (Región de Atacama)

Prospecto de Tierras Raras asociado a sistemas IOCG y ocurrencias uraníferas en la franja costera de Atacama. Ha contado con trabajos de prospección, magnetometría terrestre e investigaciones geocronológicas regionales.

- **Compañía responsable:** ENAMI + CChEN (prospecto histórico con cooperación técnica)

- **Ubicación:** Provincia de Chañaral/Diego de Almagro, Cordillera de la Costa, Región de Atacama
- **Recursos:** Ocurrencias REE y U relacionadas a IOCG; mineralizaciones de Fe-Óxidos con Cu y Au subordinado en el distrito.
- **Estado y producción esperada:** Exploración/prospección; sin producción declarada pública.

Origen del mineral (fuente):

Rocas del basamento de la Cordillera de la Costa (intrusivos/volcánicos), con alteraciones ferro-óxidas; mineral portador de REE asociado a matrices fosfatadas/fluorocarbonatadas subordinadas y fases accesorias en IOCG.

Métodos de procesamiento previstos/ensayados:

Ensayos de laboratorio orientados a concentración y obtención de REO a escala piloto en iniciativas vinculadas; posible ruta hidrometalúrgica con lixiviación ácida posterior a concentración, y separación por SX/IX en caso de escalamiento.

II. Cerro Carmen (Región de Atacama)

Prospecto de REE con apoyo de CChEN/ENAMI para “Obtención de concentrados de ETR” a escala piloto. Estudios geofísicos (magnético terrestre) y campañas de sondaje han sido reportados en la zona.

- **Compañía responsable:** ENAMI + CChEN (convenios de cooperación); apoyo SERNAGEOMIN
- **Ubicación:** Cercanías de Diego de Almagro, Región de Atacama (III Región)
- **Recursos:** REE y U en contexto IOCG costero; reportes de recursos indicados a partir de trabajos de CChEN.
- **Estado y producción esperada:** Exploración avanzada/piloto de laboratorio, por lo que no hay producción comercial publicada

Origen del mineral (fuente):

Mineralización hospedada en unidades de la Cordillera de la Costa; asociación con óxidos de Fe y fases con REE/U.

Métodos de procesamiento previstos/ensayados:

Rutas de laboratorio incluyen concentración física seguida de lixiviación ácida/Clorurada y separación SX/IX; posible precipitación selectiva (oxalatos/carbonatos) para obtención de REO.

III. Botaderos Isidora (Región de Antofagasta)

Iniciativa de exploración en botaderos con potencial presencia de elementos críticos (Cu-V-Ti-Ba-Ga-Rb-Sr) y evaluación de recuperación de REE desde residuos mineros de la franja ferrífera.

- **Compañía responsable:** APM Ltda. (titular reportado en MinMinería 2022)
- **Ubicación:** Región de Antofagasta (botaderos/relaves metalíferos)

- **Recursos:** REE potenciales en matrices de relaves/botaderos junto a elementos críticos; foco en residuos de la franja ferrífera.
- **Estado y producción esperada:** Exploración en evaluación; sin producción declarada; depende de resultados de caracterización y pilotos

Origen del mineral (fuente):

Material secundario (botaderos/relaves) proveniente de operaciones históricas; ley de REE variable y dependiente del depósito.

Métodos de procesamiento previstos/ensayados:

Rutas propuestas en Chile para relaves incluyen concentración magnética, lixiviación selectiva y precipitación/SX para recuperar productos intermedios (MREC) de REE; experiencias piloto nacionales (EcoMetales + JRI) muestran factibilidad técnica.

IV. Proyecto Biolantánidos / Aclara (Penco, Región del Biobío)

Proyecto para extraer REE desde arcillas adsorbidas de iones mediante intercambio catiónico. Ha ingresado al SEIA como “Proyecto Módulo Penco” con una planta para procesar regolito/arcillas. Es el desarrollo más avanzado de REE en Chile al 2025.

- **Compañía responsable:** Aclara Resources / Aclara Chile SpA
- **Ubicación:** Comuna de Penco, Región del Biobío (depósitos de arcillas adsorbidas de iones)
- **Recursos/metalogenia:** Predominio de HREE/LREE adsorbidos (Nd, Pr, Dy, Tb e Y) en arcillas; sin fase mineral resistente típica (monacita/bastnasita) como principal portador.
- **Estado y producción esperada:** En evaluación ambiental con adendas/ICSARA; capacidad de proceso referencial $\geq 240\text{--}320$ t/h y producción objetivo de concentrado de REE (según expedientes y notas de prensa); Producción esperada: Producción esperada: del orden de miles de t/año de concentrado (según expediente SEA); cifras finales dependen de aprobación y diseño definitivo

Origen del mineral (fuente):

Arcillas lateríticas superficiales (ion-adsorbed clays) de Penco, con método de extracción a cielo abierto de regolito.

Métodos de procesamiento previstos/ensayados:

Proceso hidrometalúrgico suave: lixiviación por intercambio iónico con sulfato de amonio/NaCl, clarificación $\rightarrow$ SX/IX $\rightarrow$ precipitación (oxalatos/carbonatos) $\rightarrow$ calcinación a REO; manejo de efluentes con recirculación y control de NH_4^+ .

CAPÍTULO IV: RELAVES Y OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA CHILE

Chile, como uno de los principales productores mundiales de cobre, genera anualmente decenas de millones de toneladas de relaves, cuya caracterización mineralógica, química y geotécnica ha sido objeto de múltiples estudios (Sernageomin, 2022; Ministerio de Minería, 2020).

La comprensión detallada de su origen, composición, propiedades y comportamiento es esencial para evaluar alternativas de reprocesamiento, recuperación de elementos críticos y gestión segura de tranques. Diversas investigaciones demuestran que los relaves pueden contener elementos estratégicos como tierras raras, cobalto y escandio, dependientes del tipo de yacimiento y del proceso metalúrgico aplicado (Gupta & Krishnamurthy, 2005; IRENA, 2022).

4.1 Relave

Este tipo de residuo está compuesto principalmente por partículas finas de roca, fundamentalmente minerales de ganga sin valor económico, junto con el agua utilizada para su transporte y pequeñas cantidades de reactivos químicos empleados en el procesamiento mineral (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Lottermoser, 2010). En el caso de la flotación de sulfuros de cobre, una fracción de colectores, espumantes y modificadores permanece en el relave, aun cuando su concentración sea baja debido a su consumo durante el proceso (Jordens et al., 2013; MinMinería, 2022). Por otro lado, en operaciones auríferas que utilizan cianuración, los relaves pueden contener trazas residuales de cianuro libre o complejo, además de metales pesados solubilizados durante el proceso de extracción, lo que eleva su relevancia ambiental y obliga a controles específicos (SMA, 2020; Herrera, 2017).

En el marco regulatorio chileno, los relaves no se clasifican automáticamente como “residuos peligrosos”, ya que el Reglamento Sanitario de Manejo de Residuos Peligrosos excluye expresamente a los desechos mineros masivos de dicha categoría, aunque exige su caracterización cuando existe presencia de elementos tóxicos o condiciones que puedan representar riesgo para la salud o el ambiente (MMA, 2020; Sernageomin, 2022). La toxicidad potencial de un relave depende principalmente de su composición mineralógica; aunque en muchos casos corresponde esencialmente a roca triturada y agua, la presencia de sulfuros remanentes —como la pirita— puede inducir procesos de drenaje ácido de roca (DAR), generando oxidación y liberación secundaria de metales como arsénico, plomo o mercurio, que aumentan la peligrosidad ambiental del depósito (Lottermoser, 2010; SMA, 2020; MinMinería, 2022).

La toxicidad ambiental potencial de un relave está determinada principalmente por su composición mineralógica, geoquímica y reactiva, ya que los relaves corresponden típicamente a una mezcla de roca finamente molida, agua de transporte y trazas de reactivos residuales del procesamiento, como colectores, espumantes o lixiviantes (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022; Cochilco, 2021). Aunque muchos relaves presentan baja reactividad, la presencia de

sulfuros remanentes, especialmente pirita (FeS_2) y pirrotita, puede desencadenar procesos de drenaje ácido de roca (DAR) cuando se oxidan en presencia de oxígeno y agua, generando ácido sulfúrico que incrementa la solubilidad y movilidad de metales como arsénico, plomo, cobre, zinc o mercurio, afectando potencialmente suelos y aguas superficiales y subterráneas (Herrera, 2017; SMA, 2020; Lottermoser, 2010). Por esta razón, las regulaciones chilenas exigen a las empresas mineras implementar medidas preventivas de control de oxidación, sistemas de encapsulamiento o cobertura, y monitoreo permanente para evitar la generación de DAR (Sernageomin, 2020; MMA, 2020).

4.1.2 Proceso de Manejo de Relaves en Chile

4.1.2.1 Transporte a espesadores:

Una vez generado en la planta concentradora, el relave se transporta como pulpa mediante tuberías, canales presurizados o estaciones de bombeo hacia su instalación de disposición final, cumpliendo criterios de continuidad operativa y eficiencia energética (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022). En el depósito, el material debe ser confinado bajo normas de ingeniería geotécnica que aseguren la estabilidad física e hidráulica, según lo exigido por el Decreto Supremo N.º 248, que regula diseño, construcción, operación y cierre de tranques de relaves en Chile (Sernageomin, 2007/2020).

4.1.2.1.1 Espesadores

Previo a su disposición final, muchas operaciones chilenas incorporan espesadores de alta densidad o espesadores convencionales, cuyo objetivo es incrementar la concentración de sólidos en la pulpa, reduciendo el contenido de agua y mejorando la eficiencia de transporte y disposición (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013). Estos equipos permiten obtener pulpas con un porcentaje de sólidos significativamente mayor, lo cual reduce:

- el volumen hidráulico a transportar
- la necesidad de grandes superficies de decantación
- la generación de aguas claras, el riesgo de licuefacción en el depósito
- el consumo total de agua fresca al facilitar su recuperación (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022).

Las operaciones de espesamiento son especialmente críticas en zonas áridas del Norte Grande, donde faenas como Chuquicamata, Andina y Caserones utilizan espesadores de alta densidad (HDS) o espesadores de pasta para optimizar el retorno de agua de proceso y reducir la evaporación (Sernageomin, 2022; Avilés, 2024). Los espesadores logran remover parte importante del agua sobrenadante mediante mecanismos de floculación, sedimentación controlada y compresión del fango, permitiendo que el depósito reciba una pulpa más densa y estable desde el punto de vista geotécnico (Lottermoser, 2010; SMA, 2020).

Una vez depositado el relave espesado o convencional, ocurre la sedimentación de los sólidos, mientras que el agua clara se acumula en sectores profundos del depósito. Esta agua es recuperada mediante estructuras de decantación, como torres hidráulicas, caissons o balsas flotantes, y posteriormente recirculada a la

planta para su reutilización en molienda, flotación o enfriamiento de equipos (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022). Este sistema circular es crucial en un país como Chile, donde la mayoría de las faenas se localiza en áreas de déficit hídrico severo, por lo que la eficiencia de recirculación es un indicador clave de sostenibilidad (IRENA, 2022; Sernageomin, 2022).

4.1.2.1.1 Relaves espesados

El espesamiento se emplea para aumentar el porcentaje de sólidos antes de la disposición final, utilizando espesadores convencionales o de alta densidad (HDS). Esto reduce el volumen de agua sobrenadante, disminuye el tamaño de la laguna y aumenta la estabilidad hidráulica del depósito (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013; MinMinería, 2022).

Los relaves espesados desarrollan conos de sedimentación y presentan menor riesgo de licuefacción, ya que la pulpa llega al depósito con menor saturación y mayor cohesión aparente (Fourie, 2009; Villavicencio et al., 2014).

a. Relaves en pasta

El relave en pasta es una variante aún más densa que el espesado, con contenidos de agua reducidos y comportamiento reológico cohesivo, lo que permite construir depósitos con menor requerimiento de muros externos (Jewell & Fourie, 2006; Sernageomin, 2020).

Contienen típicamente 10–25% de agua y una fracción fina elevada ($<20\ \mu\text{m}$), consolidándose rápidamente y eliminando casi por completo la laguna superficial (Fourie, 2009).

b. Relave filtrado (dry stacking)

El relave filtrado implica remover casi toda el agua mediante filtros prensa o filtros cerámicos, logrando un material con 80–85% de sólidos que puede transportarse con correas o camiones y depositarse en forma de apilamientos secos (ICMM, 2019; Wise et al., 2020).

Este método reduce significativamente los riesgos hidráulicos, pero incrementa los costos energéticos y requiere superficies de mayor extensión (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022).

Finalmente, el proceso completo de manejo de relaves involucra: transportar la pulpa desde la planta, espesar (si aplica) para maximizar recuperación de agua, depositarla en un depósito de ingeniería, decantar y recuperar agua clara, y ejecutar un plan de cierre y postcierre, que asegure estabilidad física, química y ambiental a largo plazo (SMA, 2020; MMA, 2020; Sernageomin, 2022).

4.1.3 Métodos de disposición y diseño de tranques de relave

Geomorfológicamente, un depósito de relaves se configura como una gran obra de ingeniería compuesta por un muro de contención (normalmente construido con arenas del mismo relave o con materiales roca), que confina un impoundment interior que puede ocupar extensiones de varios kilómetros cuadrados (Sernageomin, 2020). Debido a su escala, estas estructuras se convierten en macroformas artificiales del paisaje, frecuentemente visibles en

valles, quebradas y cuencas del norte y centro del país (MinMinería, 2022). Chile posee 836 depósitos de relaves identificados según el Catastro Nacional de Relaves 2024, los cuales almacenan un total estimado de más de 13.367 millones de toneladas de material, lo que evidencia la magnitud física del pasivo minero acumulado (Sernageomin, 2024; Cochilco, 2021).

Según Sernageomin (2024), aproximadamente 97% de los depósitos de relaves del país corresponden a tranques convencionales o embalses, y solo 3% corresponden a tecnologías innovadoras como espesados, pasta o filtrado, principalmente debido a costos y limitaciones topográficas (Sernageomin, 2024; Cochilco, 2021).

En términos geotécnicos, los relaves suelen presentar alta saturación, baja densidad relativa, baja cohesión y una susceptibilidad significativa a la licuación, especialmente bajo solicitaciones sísmicas, condición crítica en un país con alta sismicidad como Chile (Sernageomin, 2020; SMA, 2020). Por ello, el diseño estructural de depósitos de relaves incorpora análisis de estabilidad en estado estático y dinámico, evaluación de riesgo hidrológico, sistemas de drenaje internos, monitoreo piezométrico y prácticas de operación que aseguren la estabilidad física del depósito frente a terremotos, lluvias extremas y otros eventos naturales relevantes (MMA, 2020; Sernageomin, 2022).

En Chile se han desarrollado diversos tipos de depósitos de relaves, diferenciados principalmente por la forma en que se construye el muro de contención, la metodología de crecimiento estructural y la densidad de la pulpa que se deposita, aspectos que influyen en su desempeño geotécnico, hidráulico y ambiental (Sernageomin, 2020; Lottermoser, 2010; Vick, 1990). La tipificación responde tanto a la historia minera del país como a la evolución de los estándares de seguridad, especialmente considerando la alta sismicidad del territorio (MMA, 2020; Villavicencio et al., 2014).

4.1.3.1 Tranque de relaves (método convencional)

Los tranques convencionales han sido históricamente el tipo predominante de depósito en Chile. Su principio constructivo se basa en utilizar el propio relave grueso, principalmente arena cicloneada, como material para formar el muro de contención, mientras que la fracción fina (lamos y arcillas) queda depositada en la cubeta interna (Sernageomin, 2020; Vick, 1990; Rico et al., 2008).

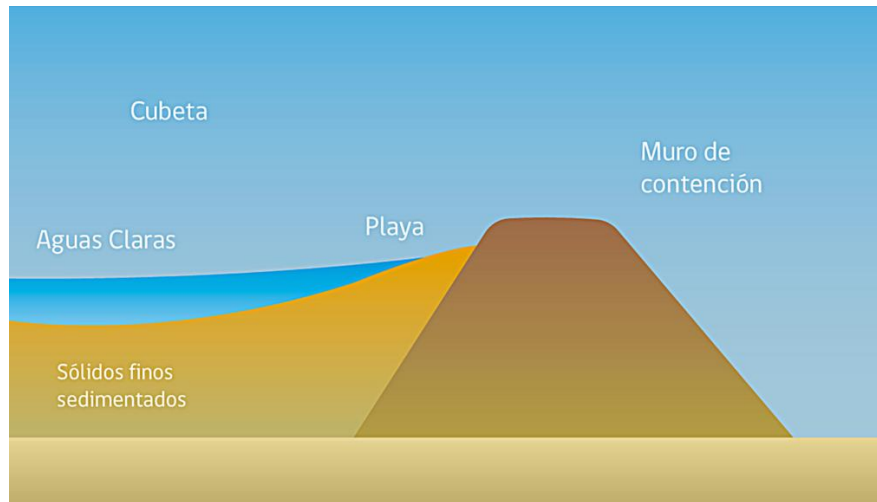


Ilustración 18. Esquema de un tranque de relaves.

Fuente: Sernageomin

El proceso se inicia mediante hidrociclones, que separan la fracción arenosa (generalmente entre 150–600 μm) para construir el dique, compactándola capa por capa, mientras que las partículas finas (<75 μm) se distribuyen hacia el interior, desarrollando zonas de baja permeabilidad y alta saturación (González, 2022; Castro & Sánchez, 2019).

Los tranques se elevan periódicamente aplicando uno de tres métodos históricos:

- i. Aguas arriba
- ii. Aguas abajo
- iii. Eje central

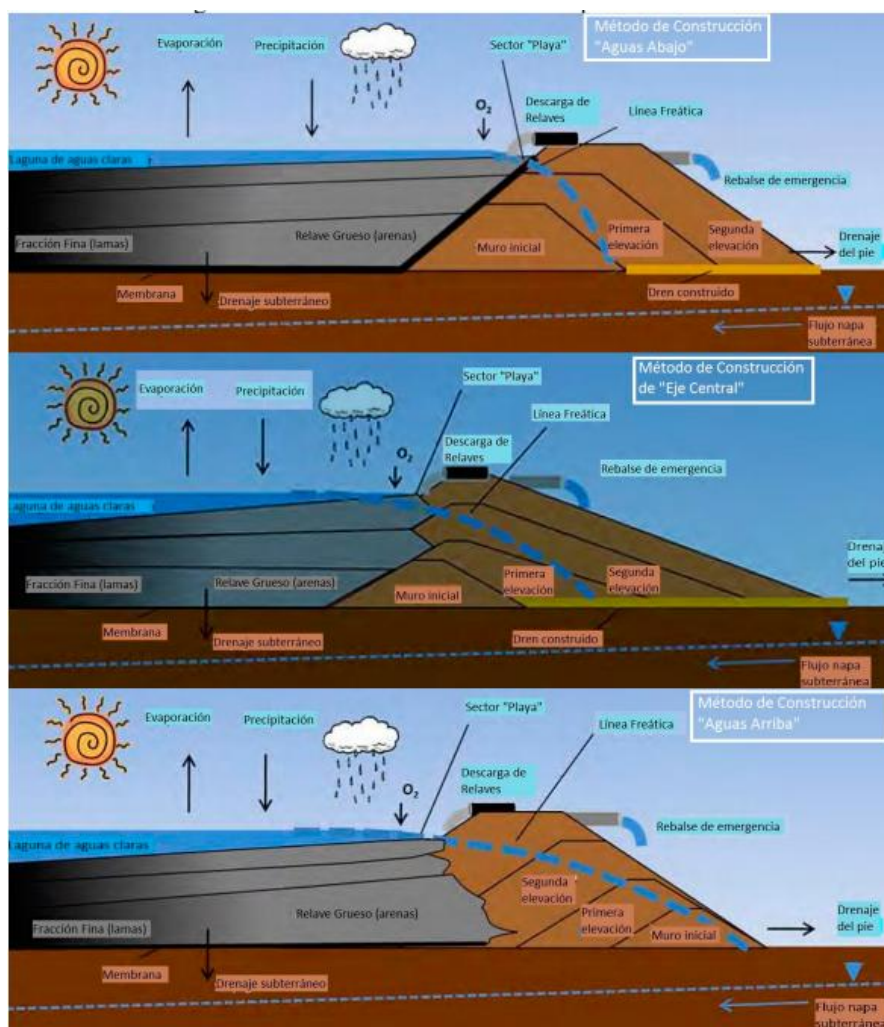


Ilustración 19. Métodos constructivos de Tranques de Relaves.

Fuente: Sernageomin

Sin embargo, en Chile el método aguas arriba fue oficialmente prohibido en 1970, debido a su elevada vulnerabilidad frente a sismos, ya que cada nueva elevación se apoya sobre relaves previamente depositados, los cuales presentan baja resistencia no drenada y alta susceptibilidad a licuación (Fourie, 2009; Sernageomin, 2020; Villavicencio et al., 2014). Esta prohibición surgió tras el colapso del tranque El Cobre en 1965, asociado a un sismo de magnitud 7.4, que provocó aproximadamente 250 víctimas fatales y motivó la promulgación del Decreto Supremo N.º 86, antecedente directo de la regulación moderna (Hauser, 2001; Sernageomin, 2007). Los registros del inventario de SERNAGEOMIN muestran que hay 231 tranques construidos con el método aguas arriba en el país, considerado menos resistente frente a sismos y condiciones climáticas adversas. De los cuales, el 74% se encuentra en la región de Coquimbo, como se muestra en el gráfico siguiente (Figura 8):

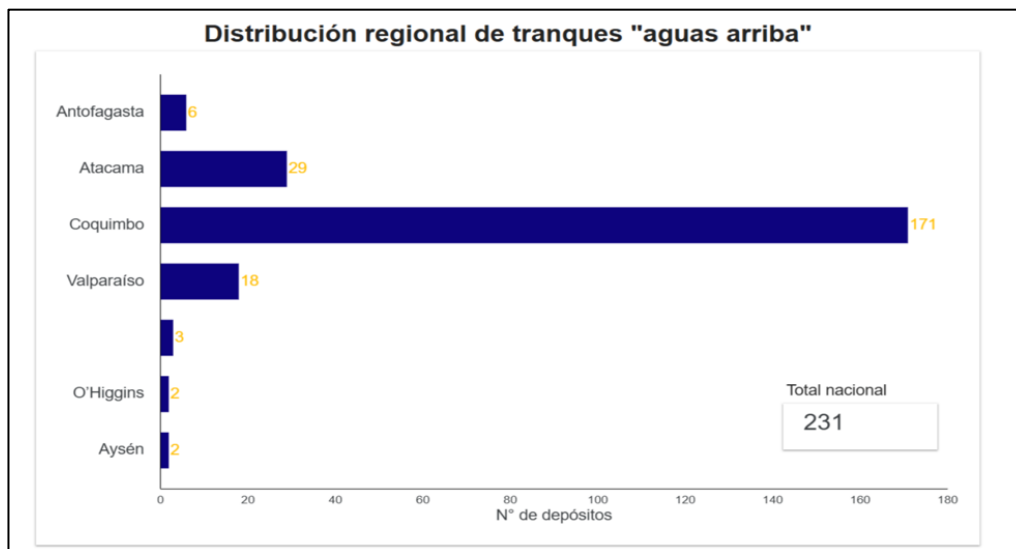


Figura 8. Distribución regional de tranques agua arriba.
Fuente: Sernageomin, mayo 2025

Los métodos permitidos hoy son:

- **Aguas abajo:** Cada ampliación del muro se apoya sobre material nuevo hacia el exterior, ensanchando la base y proporcionando la configuración más estable frente a cargas dinámicas (Vick, 1990; Jefferies & Been, 2016).
- **Eje central:** Las elevaciones se desarrollan sobre el eje del muro original, combinando características de estabilidad y eficiencia en el uso de material (Sernageomin, 2020).

Gracias a estas técnicas y a la alta ingeniería aplicada, los tranques chilenos pueden alcanzar alturas superiores a 100 m, considerados entre los más robustos del mundo (Villavicencio et al., 2014; Jefferies & Been, 2016). Chile fue pionero internacional en prohibir los muros aguas arriba, décadas antes que Canadá o Brasil (Wise et al., 2020; ICOLD, 2016).

4.1.3.2 Embalses de relaves

Un embalse de relaves consiste en una estructura donde el muro de contención está construido íntegramente con material de empréstito, ya sea roca, gravas o suelos ajenos al relave, o bien se aprovechan depresiones naturales del terreno (Vick, 1990; Sernageomin, 2020). Estos depósitos (Figura 9) funcionan como un “estanque” o cuenca, en donde el relave se acumula dentro de una estructura impermeabilizada, minimizando filtraciones mediante geomembranas o capas compactadas de baja permeabilidad (ICOLD, 2016; Lottermoser, 2010).

Muchos embalses antiguos se emplazan en valles andinos, aprovechando cerramientos naturales, lo que minimizaba el volumen de obra civil (Hauser, 2001).

Los depósitos deben diseñarse para resistir el terremoto máximo creíble (MCE) y eventos hidrológicos extraordinarios, como lluvias de periodo de retorno de 1000

años (SMA, 2020; MinMinería, 2022). El diseño, construcción y operación involucran equipos multidisciplinarios: geotécnicos, hidrólogos, geoquímicos, ingenieros civiles y especialistas en monitoreo e instrumentación avanzada (ICMM, 2019; Sernageomin, 2020).

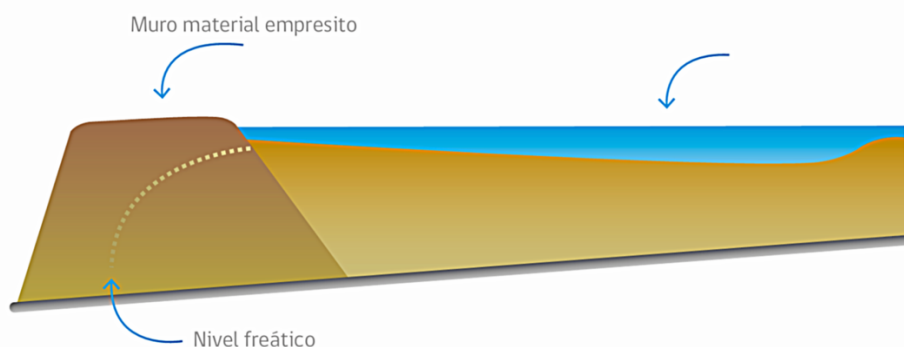


Figura 9. Esquema de embalse relaves.
Fuente: Sernageomin

4.1.4 Componentes Principales de disposición de relaves

Los depósitos de relaves son obras de ingeniería geotécnica compleja, diseñadas para almacenar residuos masivos de la minería metálica bajo condiciones seguras y estables durante la operación y el postcierre. Su configuración incorpora diversos componentes estructurales e hidráulicos cuya función conjunta es garantizar la estabilidad física, el control del agua, la seguridad ambiental, y la integridad estructural, particularmente en un país altamente sísmico como Chile (Sernageomin, 2020; Vick, 1990; Villavicencio et al., 2014).

A continuación, se presentan los componentes principales del sistema (Figura 10):

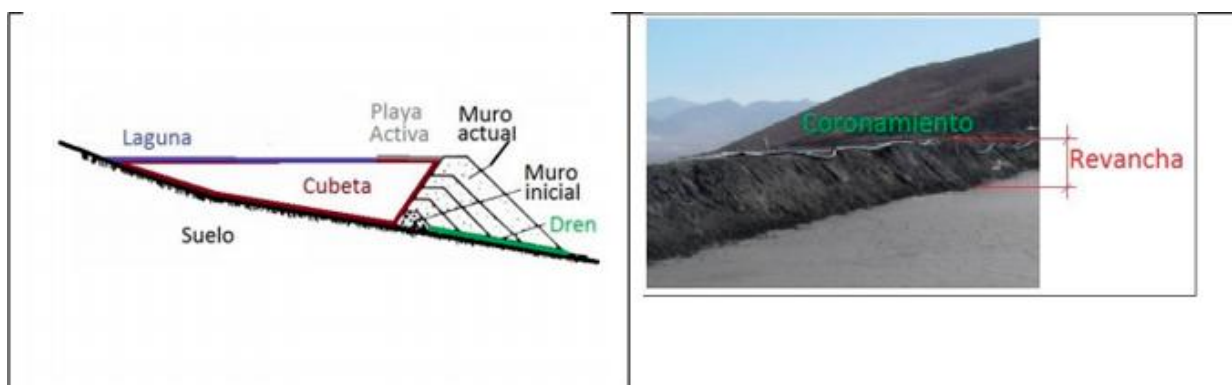


Figura 10. Partes de un depósito de relaves en general.
Fuente: Sernageomin

4.1.4.1 Cubeta

La cubeta corresponde al volumen físico donde se deposita la fracción fina del relave (lamos y arcillas), junto con la mayor parte del agua del proceso, generando una laguna de aguas claras producto de la sedimentación natural de partículas de granulometría muy baja ($<75 \mu\text{m}$) (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022). La cubeta actúa como un impoundment interno, cuya capacidad depende de la topografía, del muro perimetral y del método constructivo, siendo fundamental para el manejo hídrico y para controlar la distancia entre la laguna y el muro, dado que su proximidad incrementa los riesgos de inestabilidad del talud (ICOLD, 2016; Jefferies & Been, 2016).

4.1.4.2 Muro o prisma perimetral (prisma resistente)

El muro perimetral, también denominado prisma resistente, es la estructura fundamental que confina los relaves y define la estabilidad física del depósito (Vick, 1990; Sernageomin, 2020). Se construye con materiales cicloneados (arena de relave) o con material de empréstito (roca compactada), dependiendo del tipo de instalación.

La resistencia del muro depende de parámetros geotécnicos tales como densidad relativa, cohesión, ángulo de fricción interna, presión de poros y drenaje interno, siendo crítico mantener niveles piezométricos bajos para evitar condiciones susceptibles a licuación (Villavicencio et al., 2014; Fourie, 2009).

4.1.4.3 Sistema de descarga, clasificación y selección

El sistema de descarga controla la distribución espacial de sólidos dentro de la cubeta y define patrones de sedimentación. Muchos depósitos incluyen hidrociclones, que separan la fracción gruesa (arena) para la construcción del muro y envían la fracción fina hacia el interior (González, 2022; Castro & Sánchez, 2019).

Este sistema determina la geometría de la playa, influenciando la pendiente hidráulica, la posición de la laguna y el comportamiento geotécnico del depósito (Sernageomin, 2020; ICOLD, 2016).

4.1.4.4 Poza de aguas claras o laguna de decantación

La laguna de aguas claras corresponde al cuerpo de agua superficial generado por la sedimentación de sólidos finos. Es fundamental para el sistema de recuperación y recirculación de agua, ya que las plantas mineras dependen de este retorno para reducir el consumo de agua fresca (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022).

Se debe mantener lo más alejada posible del muro para evitar la saturación del talud, ya que la proximidad de la laguna aumenta las presiones de poro y el riesgo de falla por filtraciones o erosión interna (ICOLD, 2016; Jefferies & Been, 2016).

4.1.4.5 Sistema de drenaje

El sistema de drenaje interno, puede incluir dedos drenantes, chimeneas de drenaje, drenes horizontales o lechos filtrantes. Tiene por objeto reducir el nivel

freático del muro, controlar infiltraciones y mejorar la estabilidad global del depósito (Fourie, 2009; Villavicencio et al., 2014).

Estos sistemas incluyen filtros granulares diseñados bajo criterios de gradación para evitar su colmatación por finos (ICOLD, 2016; Sernageomin, 2020).

4.1.4.6 Sistema de impermeabilización de la cubeta

En depósitos donde el relave contiene metales pesados, arsénico, cianuro o sulfatos, se utilizan sistemas de impermeabilización para evitar infiltraciones al subsuelo. Estos sistemas pueden incluir geomembranas de HDPE, arcillas compactadas (CBR), geotextiles y capas drenantes (SMA, 2020; Lottermoser, 2010).

Su objetivo es proteger las aguas subterráneas y permitir un manejo hídrico compatible con las exigencias ambientales (MMA, 2020).

4.1.4.7 Canales de desvío

Los canales de desvío son obras hidráulicas construidas en las laderas o alrededores del depósito para captar y desviar aguas lluvias, evitando que entren a la cubeta y aumenten el volumen hidráulico (Sernageomin, 2020; ICMM, 2019).

Su dimensionamiento considera eventos extremos, frecuentemente lluvias con periodo de retorno de 500 a 1000 años, debido al carácter crítico de la sobrecarga en el depósito (MMA, 2020).

4.1.4.8 Berma de coronamiento

La berma de coronamiento es la franja horizontal ubicada en la parte superior del muro, que actúa como plataforma de operación, soporte de drenajes, bermas de seguridad y control topográfico (Jefferies & Been, 2016; Sernageomin, 2020). Su estabilidad es clave para inspecciones, instrumentación y tránsito de maquinaria.

4.1.4.9 Revancha

La revancha es la diferencia de altura entre el coronamiento y la superficie interna del relave o la laguna. Se define una revancha mínima para evitar que la laguna alcance el muro y comprometa su estabilidad, y una revancha máxima para evaluar riesgos de sobrellenado (ICOLD, 2016; Sernageomin, 2020). Valores insuficientes de revancha se asocian a fallas catastróficas en múltiples incidentes históricos a nivel mundial (Wise et al., 2020).

4.1.4.10 Muro de partida o inicial

El muro de partida corresponde a la primera estructura construida antes de iniciar la operación del tranque. Suele hacerse con material grueso de préstamo (enrocados, gravas), y su función es separar la zona de arenas de la zona de lamas durante los primeros ciclos de operación (Vick, 1990; Sernageomin, 2020).

Su altura inicial condiciona la altura futura del prisma de arenas y la revancha durante toda la operación.

4.1.4.11 Muro de pie

El muro de pie se ubica aguas abajo del muro resistente y sirve para contener el pie estructural del talud, mejorar drenaje y evitar erosión o expulsión de materiales (Jefferies & Been, 2016; Sernageomin, 2020). Se construye típicamente en enrocado.

4.1.4.12 Muro de cola

El muro de cola se ubica aguas arriba y cierra la parte interna del depósito, permitiendo confinar la cubeta en zonas donde la topografía no ofrece un cierre natural (Vick, 1990; ICOLD, 2016). Puede ser construido en tierra o siguiendo métodos similares al muro principal

Dado que en Chile ocurren múltiples sismos >7 Mw cada década, la probabilidad de que un depósito enfrente un evento extremo durante su vida útil es prácticamente del 100% (MMA, 2020; Villavicencio et al., 2014). Por ello, la normativa exige que todos los proyectos sigan principios estrictos de mecánica de suelos, ingeniería geotécnica avanzada, drenaje interno, modelaciones numéricas y análisis sísmicos dinámicos (Jefferies & Been, 2016; ICOLD, 2016; Sernageomin, 2020).

4.2 Características mineralógicas y físicas de los relaves

4.2.1 Granulometría

Desde un punto de vista físico, el relave corresponde a un lodo de partículas finas dentro del rango arena-limo, con tamaños frecuentemente inferiores a 0,1 mm, suspendidas en agua de proceso utilizada para su transporte hidráulico (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022). Durante su depósito en un tranque o embalse, las partículas más gruesas sedimentan cerca del punto de descarga y conforman una playa arenosa, mientras que los lamos finos y arcillas se desplazan hacia sectores más interiores del depósito, donde la velocidad de flujo disminuye, generando zonas altamente saturadas (Herrera, 2017). Esto produce una estratificación textural, con bordes más drenables y un núcleo central saturado, lo que influye en las propiedades geotécnicas, permeabilidad, consolidación y riesgo de licuefacción del depósito completo (SMA, 2020; Sernageomin, 2020).

Las características granulométricas de los relaves mineros chilenos dependen directamente de la mena procesada y del circuito de conminución empleado, usualmente molienda SAG seguida de molinos de bolas en pórfidos cupríferos, o molienda más fina en circuitos polimetálicos y auríferos. Estas granulometrías condicionan la liberación mineral, el comportamiento geoquímico y la estabilidad geotécnica del depósito (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022). En general, los relaves presentan distribuciones típicas con D50 entre 40–150 μm dependiendo del tipo de mena, como se muestra en la Tabla 26, con fracciones finas que pueden superar el 50% en menas polimetálicas o refractarias (Herrera, 2017; González, 2022).

Tabla 26. Granulometría típica de relaves por tipo de mena

Tipo de mena	Circuito típico	D50 (μm)	D80 (μm)	Fracción fina (%)	Fuente
--------------	-----------------	-----------------------	-----------------------	-------------------	--------

Pórfidos Cu + (SAG bolas)	Molienda primaria SAG + bolas	80–150	180–250	20–40%	(González, 2022; Sernageomin, 2022)
Polimetálicos Pb–Zn–Ag	Molienda fina	40–80	120–180	40–60%	(Herrera, 2017; Castro & Sánchez, 2019)
Auríferos refractarios	Molienda ultrafina	20–50	60–120	50–70%	(Herrera, 2017)
Óxidos de Cu (ripios)	Lixiviación + chancado	>500	>1000	<10%	(Cochilco, 2021)
Férricos IOA/IOCG	Separación magnética	100–200	200–350	10–25%	(Filippova et al., 2013; MinMinería, 2022)
Relaves con arcillas iónicas	Meteorización	5–30	20–80	60–80%	(Avilés, 2024; Meng et al., 2019)

Los valores granulométricos presentados reflejan rangos típicos obtenidos en faenas chilenas según datos publicados por Sernageomin, Cochilco y estudios académicos recientes (Sernageomin, 2022; Cochilco, 2021; Herrera, 2017). La granulometría influye en la liberación del mineral hospedante, la deportación de elementos críticos como REE y los comportamientos de consolidación y permeabilidad en el depósito de relaves (Lottermoser, 2010).

4.2.2 Mineralogía

Mineralógicamente, los relaves constituyen un reflejo directo de la mena original procesada, menos las fases económicas recuperadas durante la concentración, por lo que su composición corresponde principalmente a minerales de ganga y a fracciones residuales de minerales sulfurados u óxidos no recuperados en planta (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Lottermoser, 2010). Diversos estudios indican que más del 80% de la masa total de un relave corresponde a minerales de baja reactividad económica tales como cuarzo, feldespatos, micas, arcillas y carbonatos, acompañados de un 10–15% de sulfuros remanentes, principalmente pirita, calcopirita, pirrotita o esfalerita, dependiendo del tipo de mineral tratado y de la eficiencia de flotación o lixiviación (González, 2022; Herrera, 2017). En el caso particular de relaves de cobre por flotación, la fracción residual contiene sulfuros de Fe–Cu que no lograron flotar, además de óxidos de hierro —como hematita y goethita— y otros minerales no valiosos que quedan atrapados en la matriz mineralógica fina (Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022).

Esta retención mineral implica que los relaves pueden conservar elementos potencialmente aprovechables, tales como cobre residual (~0,1%), molibdeno, oro, plata, así como impurezas metálicas o metalometaloides, tales como arsénio, antimonio o mercurio, atrapadas dentro de los sulfuros y óxidos presentes (SMA, 2020; Lottermoser, 2010). Investigaciones geoquímicas recientes demuestran que numerosos depósitos de relaves en Chile

contienen concentraciones detectables de Cu, Mo, Zn, Ni, Pb e incluso elementos de tierras raras (REE), debido a que los procesos metalúrgicos históricos eran menos eficientes y no estaban orientados a recuperar elementos críticos o estratégicos (Herrera, 2017; Castro & Sánchez, 2019).

Por ejemplo, campañas analíticas realizadas por Sernageomin en 2023–2024 evidencian la presencia de elementos como escandio, itrio, tántalo y lantánidos ligeros (LREE) en relaves históricos del Norte Grande y Norte Chico, confirmando que antiguamente los circuitos se enfocaban exclusivamente en Cu y Mo, dejando una fracción importante de elementos críticos sin recuperar (Sernageomin, 2024; MinMinería, 2022). Este fenómeno convierte a los relaves chilenos en “yacimientos secundarios”, con un interés creciente para la minería de re-procesamiento orientada a minerales críticos y recuperación de REE, lo cual se analiza en detalle en las secciones económicas (IRENA, 2022; Cochilco, 2021).

4.2.3 Mena Original

Los relaves provenientes de pórfidos cupríferos contienen cuarzo, feldespatos, biotita, clorita y sulfuros como pirita y calcopirita residual (Jackson & Christiansen, 1993; Castro & Sánchez, 2019). Los relaves auríferos presentan pirita, arsenopirita, galena y esfalerita, mientras que los depósitos IOA incluyen magnetita, apatito y actinolita (Herrera, 2017; González, 2022). La presencia de apatito en relaves ferríferos de Atacama ha sido asociada a concentraciones altas de P₂O₅ y REE (MinMinería, 2022; Zhang & Edwards, 2012).

Mineralogía por región:

Norte Grande (Regiones I–II)

Los relaves del Norte Grande provienen principalmente de pórfidos cupríferos, mostrando cuarzo, feldespatos, biotita y pirita residual (Sernageomin, 2022; Cochilco, 2021). Estudios mineralógicos confirman presencia menor de apatito y allanita con REE (IRENA, 2022; González, 2022).

Norte Chico (Regiones III–IV)

Los relaves IOA contienen magnetita, apatito y actinolita, concentrando REE en apatito (MinMinería, 2022; Market Review, 2024). Relaves auríferos presentan pirita, arsenopirita y jarosita por oxidación superficial (Herrera, 2017; Núñez, 2018).

Zona Central (Regiones V–RM–VI)

Relaves de Andina, Los Bronces y El Teniente contienen cuarzo, feldespatos, illita–esmectita y sulfuros residuales (Jackson & Christiansen, 1993; Castro & Sánchez, 2019). Se registran trazas de allanita y monacita (Minerals, 2019; Avilés, 2024).

Zona Sur (Regiones VII–IX)

Relaves pequeños auríferos presentan cuarzo, caolinita, pirita y jarosita (ENAMI, 2017; Lottermoser, 2010). No presentan REE debido al origen geológico (Cochilco, 2020).

4.2.4 Gangas Y Minerales Residuales

Las gangas predominantes incluyen cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, muscovita y minerales de arcilla como illita y esmectita (Lottermoser, 2010; Núñez, 2018). Los sulfuros residuales presentes varían según la mena: pirita y calcopirita en pórfidos; arsenopirita, galena y esfalerita en vetas polimetálicas. Estudios realizados mediante QEMSCAN han identificado allanita, monacita y apatito en algunos relaves cupríferos, sugiriendo el potencial para REE (Minerals, 2019; González Plaza, 2022).

A continuación, en la Tabla 27 se presenta el resumen por región según minerales gangas presentes en el relave.

Tabla 27. Mineralogía predominante en relaves por región

Región	Minerales Ganga	Minerales Residuales
II	Cuarzo, Feldespatos, Micas	Pirita, Calcopirita, Molibdenita
III-IV	Magnetita, Actinolita	Apatito, Hematita
V-RM-VI	Cuarzo, Illita-Esmectita	Calcopirita fina, Monacita
VII-IX	Cuarzo, Caolinita	Pirita, Jarosita

4.2.4.1 Reactivos residuales

Los relaves presentan reactivos usados en flotación tales como xantatos, espumantes tipo MIBC y cal, además de depresores como cianuro en circuitos auríferos (CIT, 2019; ENAMI, 2017). Algunos relaves polimetálicos contienen ZnSO₄, NaCN y colectores orgánicos de flotación diferencial. Estos reactivos pueden afectar la geoquímica del tranque y la formación de fases secundarias (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020).

4.2.4.2 Fases secundarias

La oxidación superficial de relaves genera formación de minerales secundarios como jarosita, goethita, hematita, schwertmannita y sulfatos solubles, especialmente en zonas áridas del norte (Sernageomin, 2020; Castro & Sánchez, 2019). Relaves antiguos presentan intensa oxidación de pirita, generando drenaje ácido potencial y precipitación de sulfatos de hierro (Herrera, 2017).

4.2.4.3 Arcillas presentes

Las arcillas presentes incluyen illita, caolinita, montmorillonita/esmectita e interestratificados I-S, dependiendo del grado de alteración hidrotermal (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Avilés, 2024). En pórfidos predomina illita-esmectita; en vetas auríferas la caolinita es dominante; en depósitos IOA las arcillas son menores pero presentes en zonas de alteración. La mineralogía de arcillas condiciona la reología y filtrabilidad del relave (Castro & Sánchez, 2019).

A continuación, se presenta en la Tabla 28 las arcillas presentes por región.

Tabla 28. Arcillas presentes en relaves por región

Región	Arcillas	Observaciones
II	Illita, Esmectita	Predominan en pórfidos cupríferos.
III-IV	Clorita, Caolinita	Influencia IOCG/IOA.
V-RM-VI	Illita-Esmectita	Asociadas a alteración hidrotermal.
VII-IX	Caolinita	Relaves auríferos pequeños.

4.2.5 Yacimiento de origen

Los relaves en Chile pueden clasificarse según el tipo de yacimiento de origen: pórfidos cupríferos, vetas auríferas y polimetálicas, depósitos ferríferos tipo IOA, relaves antiguos pre-1970 y relaves de pequeña minería administrados por ENAMI (Sernageomin, 2021).

Los relaves de pórfidos provienen de faenas como El Teniente, Andina, Los Bronces o Chuquicamata, mientras que los ferríferos se originan en la Región de Atacama y Coquimbo. Los relaves antiguos son especialmente relevantes debido a sus mayores leyes residuales, derivados de procesos metalúrgicos menos eficientes (Cochilco, 2018). Estudios en depósitos antiguos como Andacollo han demostrado leyes residuales de Cu entre 0,2–0,4% y Au entre 0,5–2 g/t (Herrera, 2017).

4.3 Relaves en Chile: Catastro SERNAGEOMIN

La Ilustración 20 muestra la distribución de la densidad de depósitos de relaves en Chile. Los puntos blancos representan la ubicación de las instalaciones de relaves y los puntos negros marcan las ciudades como referencia. Las instalaciones de relaves se distribuyen en 9 de las 16 regiones de Chile, abarcando desde los 21°S hasta los 36°S en las macrozonas norte y centro-norte, que se caracterizan por condiciones áridas y grandes distancias entre ciudades. A menor escala, las instalaciones de relaves se encuentran entre los 45°S y los 47°S en la Patagonia chilena, al sur de la ciudad de Coyhaique.

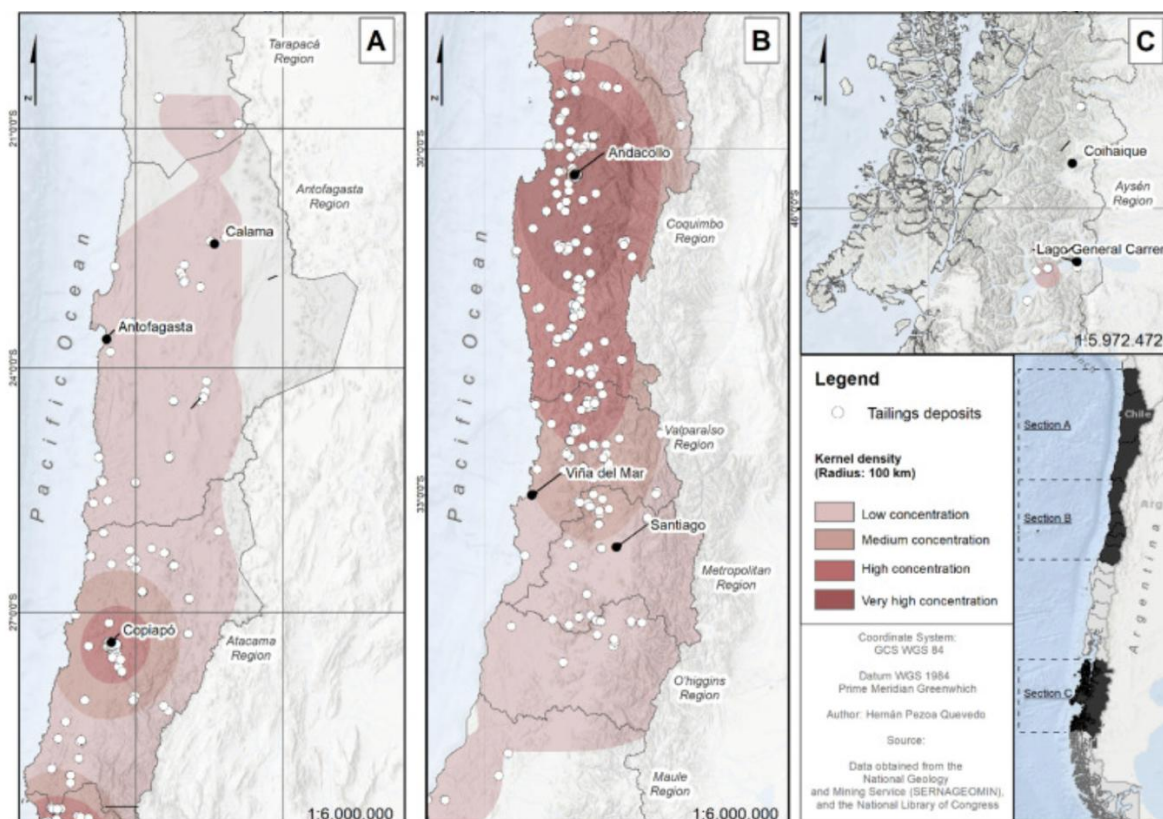


Ilustración 20. Concentración geográfica de depósitos de relaves en Chile.

Fuente: SERNAGEOMIN

Los gráficos, de las Figura 11 y Figura 12, evidencian que Chile posee una alta concentración de depósitos de relaves inactivos y abandonados, con un marcado sesgo regional hacia el norte y centro del país. En particular, la Región de Coquimbo concentra el mayor número de depósitos, superando ampliamente a Atacama y Valparaíso, lo que refleja tanto la intensidad histórica de la actividad minera como la acumulación de pasivos ambientales asociados a antiguos esquemas de explotación y beneficio mineral. Esta distribución espacial también es desglosada en la Tabla 29, siendo altamente relevante desde la perspectiva de la valorización de relaves, dado que coincide con distritos metalogénicos donde se ha documentado la presencia de apatita, óxidos de hierro y asociaciones portadoras de elementos de tierras raras (REE).

Desde el punto de vista del estado operativo, el segundo gráfico muestra que aproximadamente tres cuartas partes de los depósitos de relaves en Chile se encuentran inactivos, mientras que una fracción menor corresponde a depósitos abandonados. Esta condición implica que una parte significativa de estos relaves no está integrada actualmente a circuitos productivos ni a planes de reaprovechamiento, representando simultáneamente un riesgo ambiental latente y una oportunidad estratégica para el reprocesamiento. En el contexto de esta tesis, estos resultados refuerzan la hipótesis de que los relaves férrico-apatíticos, especialmente en la Región de Coquimbo, constituyen una fuente secundaria potencialmente relevante de REE, alineada con los principios de economía circular, reducción de pasivos ambientales y diversificación de la matriz productiva minera nacional.

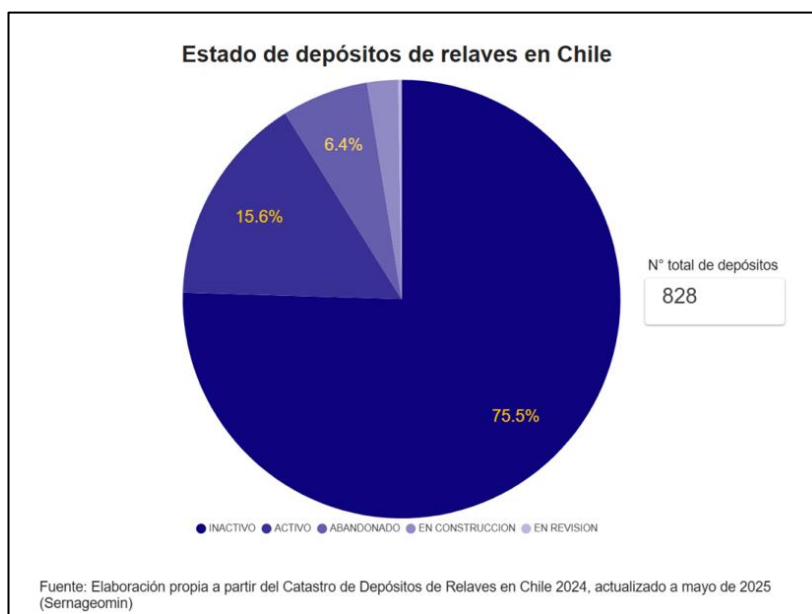


Figura 11. Estado de depósitos de relaves en Chile.

Fuente: SERNAGEOMIN

Tabla 29. Análisis de estado y distribución regional de relaves en Chile.

Región	Total	ABANDONADO	ACTIVO	ELIMINADO	EN CONSTRUCCION	EN REVISION	ESTADO INSTALACION	INACTIVO	Toneladas (suma)
I	8	3	2	2	0	0	0	1	1,080,627,493
II	57	10	15	0	2	0	0	30	5,872,770,394
III	200	9	37	2	8	0	0	144	1,547,355,443
IV	423	22	44	2	9	2	0	344	1,613,417,753
RM	28	2	7	0	0	0	1	18	3,197,497,910
V	83	4	15	1	0	0	0	63	583,792,645
VI	20	1	3	1	0	0	0	15	432,437,679
VII	6	0	4	0	0	0	0	2	784,355
XI	12	2	2	0	0	0	0	8	16,976,295

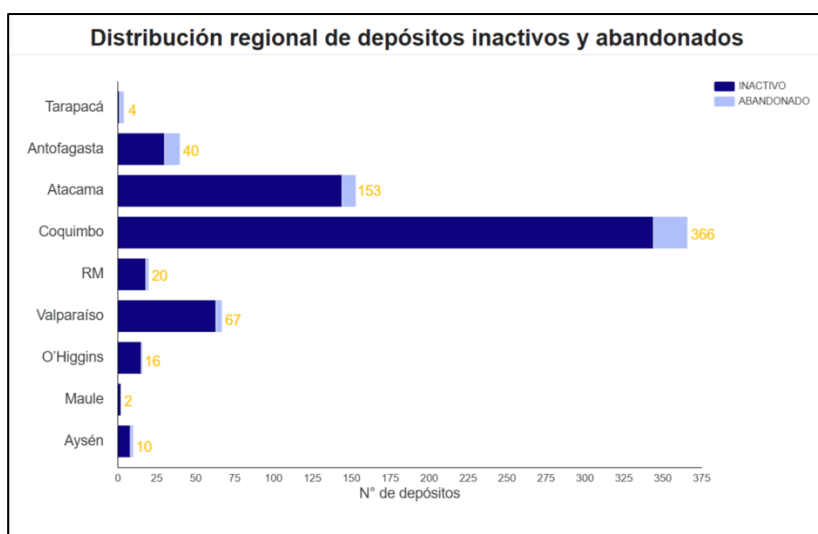


Figura 12. Distribución regional de depósitos inactivos y abandonados 2025.
Fuente: SERNAGEOMIN

Las concentraciones de REE en relaves chilenos corresponden en 75-85% a tierras raras ligeras (LREEs) como La, Ce y Nd, y en 15-25% a tierras raras pesadas (HREEs) como Dy, Er y Tb según estudios exploratorios de la Comisión Minera (2023) en Tabla 30. El material ya se encuentra triturado y depositado, lo que reduce costos de minería primaria y abre oportunidades para la economía circular y la diversificación productiva. Pero los minerales portadores (monacita, xenotima, bastnaesita y allanita), aparecen en inclusiones finas (5-50 µm) dentro de matrices de cuarzo, feldespatos y sulfuros. En relaves meteorizados se ha detectado REE adsorbidos en arcillas, con similitudes a depósitos iónicos de China.

Tabla 30. Resumen potencial de relaves en Chile

Indicador	Valor actualizado (2025)
Total de depósitos de relaves	795 depósitos en Chile (actualización Sernageomin, 2025) (Sernageomin)
Distribución por estado	128 activos, 601 inactivos, 53 abandonados, 12 en construcción y 1 en revisión (Sernageomin)

Región con mayor número de relaves	Región de Coquimbo concentra la mayor cantidad del inventario nacional (MCH)
Volumen estimado de relaves	El Catastro oficial no reporta volumen total consolidado actualizado para todos los depósitos (dato ausente en el Catastro 2025); el registro de volumen actual falta para 680 instalaciones pero ≈ 10 billones de toneladas (SERNAGEOMIN, 2023)
Concentración promedio de ERR	300–500 ppm (estudios exploratorios, Comisión Minera, 2023)
Contenido estimado de REO recuperable	≈ 27.9 t LREE y 3.4 t HREE (Comisión Minera, 2023)

Chile es actualmente importador neto de REE, con importaciones de 45 millones de USD aproximadamente en 2023 (Ministerio de Minería, 2023). Además, existen proyectos piloto en Atacama y Biobío (

CAPÍTULO III:) que apuntan a desarrollar la primera operación de tierras raras en el país hacia 2026, con una inversión estimada de USD 120 millones. Codelco, en sus planes de diversificación productiva, incluye los REE y el Cobalto como subproductos estratégicos a investigar y eventualmente explotar.

4.3.1 Minerales portadores de REE por región

Los minerales que hospedan REE en relaves chilenos varían según la región y el tipo de yacimiento de origen. En la Región II (Norte Grande), asociada a pórfidos cupríferos como Chuquicamata y Radomiro Tomic, las REE se encuentran principalmente en apatito y allanita, con contribuciones menores de monacita y titanita, tal como se ha evidenciado en estudios mineralógicos con QEMSCAN y SEM-EDS en muestras de relaves y roca fresca (Jackson & Christiansen, 1993; González, 2022; Avilés, 2024). En estos relaves, la apatita se presenta generalmente como fase accesoria de la ganga silicatada, mientras que la allanita aparece como cristal zonado hospedando LREE.

En el Norte Chico (Regiones III–IV), los relaves de depósitos IOA exhiben un claro predominio de apatito como principal hospedero de REE, acompañado de magnetita y actinolita, con monacita y xenotima presentes en menores proporciones (MinMinería, 2022; Zhang & Edwards, 2012). Los estudios de MinMinería (2022) y memorias universitarias indican que la distribución de REE en estos relaves está fuertemente controlada por el contenido de P_2O_5 y la modalidad de dispersión del apatito en la matriz de relave.

En la Zona Central (Regiones V–RM–VI), relaves de pórfidos como Andina, Los Bronces y El Teniente muestran REE en allanita, apatito y, en menor medida, monacita, con leyes totales algo menores que en el Norte Grande, pero con distribuciones similares de LREE (Castro & Sánchez, 2019; Minerals, 2019).

En el Sur (VII–IX), los relaves auríferos pequeños apenas registran REE, generalmente ligados a monacita detrítica de origen sedimentario, en niveles muy bajos que no resultan económicamente relevantes (Herrera, 2017; ENAMI, 2017).

A continuación se presenta una tabla comparativa (Tabla 31) que resume los rangos típicos de TREE y la presencia de REE clave en relaves por región y tipo

de yacimiento, basada en datos reportados por estudios académicos, investigaciones institucionales y catastro de relaves (Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022; González, 2022).

Tabla 31. Tablas comparativas de REE por región y tipo de relave

Región / Dominio	Tipo de yacimiento	TREE (ppm) típico	REE dominantes	Minerales portadores principales
II – Norte Grande	Pórfidos Cu–Mo	200–600	La, Ce, Nd, Pr	Apatito, Allanita, Monacita
III–IV – Norte Chico	IOA / IOCG	400–800+	Ce, La, Nd, Y	Apatito, Monacita, Xenotima
V–RM–VI – Zona Central	Pórfidos Cu–Mo	150–400	La, Ce, Nd	Allanita, Apatito
VII–IX – Zona Sur	Vetas auríferas	<100	REE traza	Monacita detrítica (muy menor)

Los valores de la tabla deben considerarse como rangos orientativos derivados de diferentes fuentes y campañas de muestreo, y no como leyes certificadas de recursos. Sin embargo, permiten evidenciar que el mayor potencial para recuperación de REE desde relaves se concentra en la Franja del Hierro (relaves IOA) y en algunos relaves cupríferos de la II y VI Región, donde la combinación de volumen y ley resulta más atractiva (MinMinería, 2022; Sernageomin, 2022; IRENA, 2022).

Al observar los reportes de SERNAGEOMIN, es posible concluir que en Atacama y Coquimbo predominan relaves de la franja ferrífera (IOA/IOCG: magnetita-apatita, hematita) y de pórfidos cupríferos. Siendo estos muy relevantes en este estudio por la presencia de apatita, un portador clave de REE ligeros (Ce, La, Nd, Pr), mientras que en relaves de cobre se han detectado minerales accesorios como monacita, xenotima y allanita.

Para la región de Antofagasta hay una alta presencia de relaves asociados a pórfidos de cobre, con REE en minerales accesorios dispersos. Ya existen iniciativas de minería secundaria en botaderos/relaves exploradas por ENAMI y CCHEN.

Mientras que para la región de Valparaíso y Metropolitana los relaves presentes son antiguos de minería Cu-Au, con potencial limitado de REE pero posible co-producción en esquemas de reprocesamiento.

Finalmente, en regiones del Centro-Sur, hay una menor densidad de relaves, mineralogías diversas y potencial REE más acotado, condicionado por la naturaleza de los yacimientos fuente.

4.3.2 Tipos de relaves con alto potencial económico para REE

Los relaves con mayor potencial para recuperar REE corresponden a aquellos donde las tierras raras se concentran en fases mineralógicas específicas, principalmente fosfatos (apatito, monacita), silicatos enriquecidos (allanita), óxidos de Fe asociados (IOA/IOCG) y arcillas de adsorción iónica en procesos avanzados de meteorización (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013; MinMinería, 2022). Además, estos relaves deben presentar leyes superiores al umbral típico de 300–600 ppm TREE para justificar CAPEX y OPEX elevados en lixiviación y separación (IRENA, 2022; Market Review, 2024).

En Chile, los relaves más prometedores se pueden agrupar en cuatro categorías: (i) relaves provenientes de pórfidos cupríferos con apatito abundante; (ii) relaves férricos de la Franja de Hierro (IOA/IOCG) con apatito rico en LREE; (iii) relaves polimetálicos con monacita rica en REE y fases fosfáticas; y (iv) relaves meteorizados con arcillas iónicas que permiten lixiviación suave con sulfatos o amonio (Avilés, 2024; Sernageomin, 2022).

I. Relaves de pórfidos cupríferos

Los pórfidos cupríferos constituyen los depósitos más relevantes en Chile y contienen apatito, allanita y monacita como fases portadoras de REE, especialmente en zonas de alteración potásica y propilítica (Jackson & Christiansen, 1993; MinMinería, 2022). Tras la molienda y flotación, estas fases quedan en el relave, con leyes que pueden variar entre 150 y 400 ppm TREE, con presencia destacada de Ce, La, Nd y Pr (González, 2022).

El potencial aumenta cuando: (i) hay abundante apatito; (ii) la liberación es adecuada (>50 % liberación mineralógica a <150 µm); (iii) existe infraestructura cercana para lixiviación; y (iv) hay alto volumen disponible (>100 Mt), lo cual permite diluir CAPEX (Castro & Sánchez, 2019; Sernageomin, 2022).

Las rutas de reprocesamiento más usadas incluyen separación magnética, flotación de apatito, lixiviación con HCl y extracción por solventes D2EHPA/PC88A (Jordens et al., 2013; Zhang & Edwards, 2012). Estos relaves tienen sentido económico cuando la recuperación metalúrgica puede superar 25–40 % y la ley de REE supera 300–400 ppm TREE.

II. Relaves férricos (IOA–IOCG, Franja de Hierro)

Los relaves de la Franja de Hierro contienen altas proporciones de apatito, mineral que concentra LREE (La, Ce, Nd, Pr) en cantidades de 2.000–5.000 ppm a nivel de mineral, lo cual se traduce en relaves con leyes de 300–600 ppm TREE (Sillitoe, 2003; MinMinería, 2022; Avilés, 2024).

Desde el punto de vista económico, estos relaves suelen presentar:

- i. granulometría favorable (D50: 60–120 µm)
- ii. baja presencia de sulfuros, reduciendo riesgos ambientales
- iii. alta concentración relativa de apatito
- iv. estabilidad geoquímica que simplifica el diseño de proceso (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020).

Estos depósitos representan uno de los blancos más atractivos para REE en Chile, especialmente porque permiten el uso de rutas conocidas de flotación de apatito, seguidas de lixiviación con HCl, con recuperaciones potenciales de 40–60 % (Filippova et al., 2013; Zhang & Edwards, 2012).

III. Relaves polimetálicos con monacita/xenotima

Los distritos polimetálicos del Norte Chico y altiplano presentan relaves con monacita asociada a sistemas hidrotermales Pb–Zn–Ag–Au. Estos relaves contienen fases como monacita, xenotima y allanita, con concentraciones típicas de 200–500 ppm TREE (Herrera, 2017; González, 2022).

La viabilidad mejora si la monacita está parcialmente liberada, lo cual permite flotación o separación magnética de tierras raras, pero requiere procesos de cracking térmico o alcalino (NaOH, H₂SO₄) antes de lixiviación (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).

Su complejidad mineralógica aumenta CAPEX y OPEX, pero pueden ser económicamente viables si contienen altos niveles de HREE, especialmente Dy y Tb, de alto valor económico (Market Review, 2024; USGS, 2024).

IV. Relaves meteorizados con arcillas iónicas

Las arcillas iónicas son uno de los tipos de depósitos más valiosos para REE a nivel global. Se trata de arcillas donde las REE están adsorbidas iónicamente y pueden recuperarse mediante lixiviación suave con sulfatos o amonio (Meng et al., 2019; Binnemans et al., 2013).

En Chile, existen relaves meteorizados en regiones como Atacama y Bío-Bío donde se ha observado formación parcial de arcillas iónicas en capas altamente meteorizadas (Avilés, 2024). Estos relaves muestran ventajas económicas significativas:

- i. bajo uso de reactivos
- ii. lixiviación en frío
- iii. recuperación selectiva de LREE
- iv. bajo CAPEX relativo (MinMinería, 2022).

Su potencial depende de: grado de meteorización, formación de esmectitas y caolinita, y contenido de REE adsorbidas (>150 ppm TREE adsorbidos).

V. Tipos de relaves con bajo o nulo potencial para REE

Relaves extremadamente arcillosos (por ejemplo, relaves ultrafinos de operaciones cupríferas de baja ley) tienden a presentar baja liberación mineralógica y altos costos de procesamiento, haciéndolos poco competitivos para REE (Castro & Sánchez, 2019; Sernageomin, 2022).

Relaves con mineralogía dominada por cuarzo y feldespato, sin fases portadoras de fosfatos o silicatos enriquecidos, generalmente contienen <100 ppm TREE, lo que hace inviable económicamente su reprocesamiento (Gupta & Krishnamurthy, 2005; MinMinería, 2022).

Relaves con alta presencia de sulfuros (pirita, pirrotita) presentan altos costos ambientales y de OPEX por generación de drenaje ácido, además de baja concentración de REE, siendo casi nunca viables (Lottermoser, 2010; SMA, 2020).

Relaves de carbón o industriales no metalíferos no contienen REE en cantidades recuperables (BGS, 2011; USGS, 2024).

4.4 Rutas de extracción de REE aplicables a relaves

En Chile, relaves cupríferos presentan típicamente 150–400 ppm TREE, relaves polimetálicos 200–500 ppm y relaves férricos 300–600 ppm TREE (González, 2022; Sernageomin, 2022). Estudios internacionales sugieren que leyes sobre 300 ppm TREE pueden ser económicamente viables si la recuperación supera 30–40% (Binnemans et al., 2013; Jordens et al., 2013).

En relaves de hierro (IOA/IOCG), la estrategia incluye remolienda y flotación de apatita, seguida de digestión ácida o alcalina para extraer REE, con purificación por extracción con solventes o intercambio iónico.

En relaves de pórfidos de cobre, se recomienda enfocarse en fracciones finas, con separación magnética y flotación selectiva, seguida de lixiviación con HCl o cloruración, controlando el Ce para facilitar la purificación. Los bajos contenidos de REE obligan a integrar su recuperación con otros metales (Cu, Fe, P).

Tabla 32. Resumen por región de caracterización según yacimiento proveniente.

Región	Densidad de relaves	Yacimiento de fuente	Portadores de REE	Vías de valorización
Atacama	Alta	IOA/IOCG y pórfidos Cu	Apatita, monacita, allanita	Flotación de apatita + lixiviación
Coquimbo	Muy alta	IOA/IOCG y pórfidos Cu	Apatita, xenotima	Flotación + recuperación de P/REE
Antofagasta	Media-alta	Pórfidos Cu	Allanita, monacita	Clasificación finos + WHIMS + HCl
Valparaíso–RM	Media	Cu-Au vetiformes	REE accesorios bajos	Reprocesamiento co-producto
Centro-Sur	Baja	Diversos	REE en trazas	Evaluación caso a caso

Los relaves provenientes de flotación de sulfuros son los más relevantes (abundancia) para los REE en Chile, con granulometrías típicas de P80 entre 75 y 150 μm . En estos depósitos, la fracción fina ($<20 \mu\text{m}$) concentra la mayor parte de los REE. Los relaves de procesos de lixiviación de óxidos de cobre suelen ser más gruesos (P80 $>200 \mu\text{m}$) y muestran baja concentración de REE. En el caso de los relaves IOCG/IOA (ej. El Buitre, Sierra Áspera) presentan heterogeneidad granulométrica, con fases de magnetita y apatita que aportan potencial de REE.

Y finalmente, en depósitos polimetálicos (ej. Bellavista), la granulometría es intermedia, con apatita y sulfuros como fases portadoras.

4.4.1 Elementos Críticos y Tierras Raras (REE) en Relaves Chilenos

La presencia de elementos de tierras raras y otros elementos críticos en los relaves mineros chilenos ha adquirido relevancia en el contexto de la transición energética, la demanda creciente de imanes permanentes de alto desempeño y la necesidad de diversificar las fuentes de suministro a nivel global (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

Chile, como uno de los principales productores mundiales de cobre, hierro y oro, posee cientos de depósitos de relaves distribuidos a lo largo de su territorio, muchos de los cuales se formaron a partir de yacimientos con mineralogía favorable para la concentración de lantánidos, especialmente en depósitos tipo pórfido cuprífero e iron-oxide apatite (IOA) (Sernageomin, 2022; Market Review, 2024). La consideración de estos relaves como fuente secundaria de REE exige un entendimiento detallado de su procedencia, composición mineralógica, distribución regional y posibles leyes de REO (óxidos de tierras raras) expresadas en ppm, así como de los minerales específicos que hospedan estos elementos (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens, Cheng, & Waters, 2013).

La razón fundamental por la que existen REE en los relaves chilenos se relaciona con la mineralogía original de los yacimientos explotados y el enfoque histórico de la minería, centrado en metales como Cu, Fe, Au, Mo y no en los lantánidos (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Castor & Hedrick, 2006). En pórfidos cupríferos, las REE se alojan principalmente en minerales accesorios como apatito, allanita, monacita y, en menor medida, en epidoto y titanita, los cuales no son recuperados por los circuitos convencionales de flotación de cobre y molibdeno, pasando casi íntegros al relave (Jackson & Christiansen, 1993; Jordens et al., 2013). De manera similar, en depósitos IOA de la Franja Ferrífera Chilena, las REE se concentran en apatito asociado a magnetita, pero la operación histórica se ha centrado en el hierro, dejando tanto el apatito como sus REE asociadas en el relave o en botaderos (MinMinería, 2022; Market Review, 2024). Adicionalmente, la baja valorización económica de las REE en décadas pasadas y la ausencia de mercados desarrollados para estos elementos en Chile implicaron que, incluso en casos donde la presencia de REE era conocida, no se implementaron circuitos específicos de recuperación (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022). Esto contrasta con el contexto actual, en el cual las REE son consideradas insumos estratégicos para turbinas eólicas, vehículos eléctricos, electrónica avanzada y tecnologías de defensa, lo que abre la posibilidad de reconsiderar los relaves como “minas secundarias” de elementos críticos (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

La procedencia de los relaves con potencial de REE en Chile se puede agrupar en tres grandes dominios metalogénicos:

- relaves de pórfidos cupríferos andinos
- relaves de depósitos iron-oxide apatite (IOA) e iron-oxide copper gold (IOCG) de la Franja del Hierro

- relaves antiguos o polimetálicos específicos con asociaciones fosfáticas y silicatadas particulares (Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022).

En el primer grupo se encuentran relaves asociados a faenas como Chuquicamata, Radomiro Tomic, El Teniente, Andina y Los Bronces, donde la mineralogía de la roca hospedante incluye apatito accesorio, allanita y titanita que pueden contener lantánidos ligeros (La–Ce–Nd–Pr) en proporciones de hasta cientos de ppm en roca fresca, parte de los cuales termina en el relave (Jackson & Christiansen, 1993; Avilés, 2024). En el segundo grupo, la Franja Ferrífera de las Regiones III–IV incluye yacimientos IOA como El Romeral, Los Colorados y otros depósitos magnético–apatíticos donde el apatito puede contener REE totales (TREE) en el orden de 2.000–5.000 ppm en el mineral, lo que se traduce en leyes de 200–800 ppm REO en relaves dependiendo del grado de dilución con ganga y magnetita (Zhang & Edwards, 2012; MinMinería, 2022; Market Review, 2024). Finalmente, algunos relaves antiguos auríferos y polimetálicos del Norte Chico pueden contener REE en niveles menores, asociados a monacita detrítica o apatito hidrotermal, pero en general su potencial es significativamente inferior al de los relaves cupríferos e IOA (Herrera, 2017; Núñez, 2018; Lottermoser, 2010).

Los estudios disponibles sobre REE en relaves chilenos indican que las tierras raras ligeras (LREE: La, Ce, Pr, Nd) son dominantes respecto a las tierras raras pesadas (HREE: Dy, Tb, Y, Gd) en la mayoría de los casos, reflejando el carácter típico de los pórfidos cupríferos y depósitos IOA (Gupta & Krishnamurthy, 2005; IRENA, 2022). En relaves de pórfidos cupríferos de la II y VI Región, la suma de REE totales (TREE) suele encontrarse en el rango de 200–600 ppm, con Ce y La representando aproximadamente 40–50% del total, Nd entre 10–15% y Pr, Sm y Gd en proporciones menores (González, 2022; Minerals, 2019).

En relaves IOA del Norte Chico, los TREE pueden superar los 800 ppm, con una distribución similar pero con mayor enriquecimiento relativo en Nd y Y, dependiendo de la proporción de apatito y fases asociadas (MinMinería, 2022; Zhang & Edwards, 2012).

En términos de concentración por elemento, valores típicos reportados para relaves cupríferos incluyen, por ejemplo: La 40–120 ppm, Ce 80–200 ppm, Nd 20–60 ppm, Pr 5–15 ppm y Sm 3–10 ppm, mientras que Dy y Tb rara vez exceden 5 ppm cada uno (González, 2022; Avilés, 2024). En relaves IOA, estos valores pueden duplicarse, especialmente para Ce y Nd, lo que refuerza el interés en estos depósitos como objetivo de muestreo detallado para evaluar su potencial como fuente secundaria de REE (MinMinería, 2022; Market Review, 2024).

4.4.1.1 Relaves de Pórfidos Cupríferos de Chile y Potencial de Recuperación de Tierras Raras (REE)

Los relaves generados por la explotación de pórfidos cupríferos en Chile representan uno de los pasivos mineros más voluminosos y persistentes del país, tanto por la magnitud de la industria del cobre como por la larga historia de operación de yacimientos como Chuquicamata, Radomiro Tomic, Escondida, El

Teniente, Andina y Los Bronces (Cochilco, 2021; Sernageomin, 2022). Desde el punto de vista geológico, estos yacimientos corresponden a intrusivos porfídicos afectados por zonación de alteración potásica, fílica y propilítica, cuyas asociaciones minerales condicionan la mineralogía, granulometría y comportamiento geoquímico de los relaves que se producen tras la molienda y flotación de sulfuros de cobre y molibdeno (Jackson & Christiansen, 1993; Sinclair & Blackwell, 2002).

Históricamente, el procesamiento de pórfidos cupríferos en Chile se ha focalizado en la recuperación de cobre y, en menor medida, molibdeno, sin considerar explícitamente la recuperación de elementos críticos como las tierras raras (REE) ni otros elementos estratégicos tales como cobalto o escandio (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Castor & Hedrick, 2006). Sin embargo, diversos estudios mineralógicos recientes han mostrado que minerales accesorios como apatito, allanita, monacita, titanita y epidoto presentes en estas rocas hospedan cantidades no despreciables de lantánidos, los cuales son liberados a la fracción fina durante la conminución, terminando mayoritariamente en el relave (Jordens, Cheng, & Waters, 2013; González, 2022; Avilés, 2024).

En el contexto de la transición energética y la creciente demanda de REE para la fabricación de imanes permanentes, motores de vehículos eléctricos y turbinas eólicas, ha surgido el interés por evaluar los relaves de pórfidos cupríferos chilenos como fuente secundaria de tierras raras, aprovechando tanto el volumen disponible como la infraestructura minera existente (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

4.4.1.1.1. Marco geológico

Los pórfidos cupríferos andinos de Chile se caracterizan por un sistema de zonación de alteración hidrotermal concéntrica en torno a los intrusivos mineralizados, reconocible en tres dominios principales: alteración potásica en el núcleo, alteración fílica en una envolvente intermedia y alteración propilítica en la periferia del sistema (Sillitoe, 2010; Jackson & Christiansen, 1993). La zona potásica se asocia a biotita secundaria, feldespato potásico y magnetita, además de los principales sulfuros de Cu-Fe; la zona fílica se caracteriza por la presencia de cuarzo, sericita (illita) y abundante pirita; mientras que la zona propilítica se define por clorita, epidoto, calcita y albita, con contenidos variables de pirita y calcopirita (Sinclair & Blackwell, 2002; Richards, 2013).

La distribución lateral y vertical de estas zonas de alteración determina las características del mineral alimentado a planta y, en consecuencia, la naturaleza del relave generado, dado que el circuito de conminución y flotación no discrimina entre dominios de alteración sino que los procesa en mezclas que varían según la secuencia de explotación del rajo o de las labores subterráneas (Cochilco, 2020; Castro & Sánchez, 2019). En términos de REE, la literatura indica que la apatita asociada a la alteración potásica y propilítica puede concentrar tierras raras ligeras (La, Ce, Nd, Pr), mientras que la allanita y titanita, típicas de dominios intermedios, pueden aportar fracciones adicionales de LREE

y, en menor medida, HREE (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013; Minerals, 2019).

Por lo tanto, la comprensión de cómo se combinan estos dominios de alteración en la alimentación a planta permite segmentar conceptualmente los relaves en subpoblaciones asociados mayoritariamente a material potásico, fílico o propilítico, las cuales presentan diferencias en granulometría, reactividad geoquímica, mineralogía de ganga, contenido de sulfuros residuales y potencial de REE, aspectos clave al momento de evaluar el reprocesamiento orientado a la recuperación de tierras raras (Lottermoser, 2010; González, 2022; MinMinería, 2022).

Relaves dominados por alteración potásica

Los relaves dominados por material proveniente de la alteración potásica corresponden, en general, a sectores del yacimiento cercanos al núcleo mineralizado, donde la ganga principal está compuesta por feldespato potásico, cuarzo, biotita secundaria y magnetita, acompañados de calcopirita, bornita y, en algunos casos, molibdenita (Jackson & Christiansen, 1993; Sinclair & Blackwell, 2002). La molienda requerida para liberar la calcopirita asociada a la ganga potásica suele ser intensa, alcanzando tamaños de partícula típicos del orden de $80\% < 150\text{--}200\ \mu\text{m}$ en la alimentación a flotación y generando relaves con distribución granulométrica centrada en la fracción fina (Castro & Sánchez, 2019; Cochilco, 2020). Esta granulometría fina otorga a los relaves potásicos alta superficie específica, lo que condiciona tanto la adsorción de reactivos residuales como el comportamiento geoquímico posterior en el tranque (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2022).

Desde el punto de vista geoquímico, los relaves de dominio potásico contienen fracciones apreciables de pirita residual, calcopirita muy fina y, ocasionalmente, bornita, lo que implica un potencial moderado a alto de generación de drenaje ácido de roca (DAR) bajo condiciones de oxidación superficial, especialmente en climas áridos donde la evaporación favorece la concentración de sulfatos solubles (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020). Sin embargo, la presencia de feldespato potásico y biotita proporciona cierta capacidad de neutralización ácida, modulando el pH de poros y la movilidad de metales en el tiempo, de modo que el comportamiento geoquímico real depende de la relación pirita/carbonatos y de la tasa de infiltración en el tranque (Castro & Sánchez, 2019; Núñez, 2018).

En términos mineralógicos, la ganga dominante en estos relaves está dada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa subordinada y biotita, acompañada por magnetita residual y trazas de clorita y sericita (Jackson & Christiansen, 1993; Minerals, 2019). Los minerales accesorios hospedantes de REE más relevantes en esta zona son la apatita, la allanita y, en menor proporción, la monacita y titanita, las cuales suelen encontrarse como granos finos incluidos en la ganga silicatada o asociados a los bordes de cristales de feldespato y biotita (Gupta & Krishnamurthy, 2005; González, 2022). Estudios de QEMSCAN y SEM-EDS realizados en relaves de pórfidos chilenos han identificado apatito con contenidos de LREE en el orden de 2.000–5.000 ppm en el mineral, lo que se traduce en leyes típicas de 200–400 ppm REO en la fracción de relave dominada

por material potásico, dependiendo del grado de dilución con otras litologías (González, 2022; Avilés, 2024; MinMinería, 2022).

Las propiedades geotécnicas de los relaves de origen potásico están fuertemente controladas por su granulometría fina y la proporción de limos y arenas muy finas, lo que se traduce en valores de densidad in situ relativamente bajos, alta compresibilidad y susceptibilidad a la licuefacción bajo cargas sísmicas, especialmente cuando los depósitos se encuentran saturados (Sernageomin, 2020; Sernageomin, 2022). Ensayos triaxiales y de penetración CPTu realizados en tranques de relaves cupríferos han mostrado que las fracciones de relaves más finas, típicas de dominios potásicos, presentan menores ángulos de fricción efectiva y mayores índices de vacíos, requiriendo diseños de tranques y programas de drenaje más conservadores para asegurar la estabilidad global (Lottermoser, 2010; Castro & Sánchez, 2019).

Reprocesamiento de relaves potásicos para recuperación de REE

El reprocesamiento de relaves dominados por alteración potásica para recuperar REE se basa en la concentración previa de los minerales hospedantes (principalmente apatito y allanita) y su posterior tratamiento hidrometalúrgico para transferir las tierras raras a solución, de manera análoga a los esquemas diseñados para fosfatos y concentrados complejos de REE (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013). La ruta típica propuesta incluye: remolienda selectiva del relave para mejorar la liberación de apatito y allanita, flotación de apatito mediante colectores tipo hidroxamatos y ácidos grasos modificados, posible separación magnética de fases paramagnéticas y ferromagnéticas, y, finalmente, lixiviación ácida del concentrado fosfático para solubilizar las REE (Filippova, Filippov, Lafrance, & Ouvrard, 2013; Binnemans et al., 2013).

En la flotación de apatito desde relaves potásicos, se ha demostrado que colectores como los hidroxamatos de cadena larga permiten obtener concentrados con enriquecimientos de 3–8 veces en REE respecto al relave de cabeza, siempre que el pH y la química de Ca^{2+} y Mg^{2+} en la pulpa se controlen adecuadamente (Jordens et al., 2013; Xie, 2014). Una vez obtenido el concentrado, se pueden aplicar esquemas de lixiviación con HCl o HNO_3 , que disuelven tanto Ca y P como las tierras raras, seguidos de etapas de extracción por solventes (SX) utilizando extractantes organofosforados como D2EHPA o PC88A para separar las REE del resto de los cationes (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022).

Un diagrama de flujo conceptual para relaves de dominio potásico puede resumirse en las siguientes etapas principales: (1) espesamiento y remolienda del relave; (2) flotación de apatito/allanita; (3) separación sólido-líquido y filtración del concentrado; (4) lixiviación ácida de concentrado fosfático bajo condiciones controladas de temperatura y relación sólido-líquido; (5) clarificación del licor y extracción por solventes de REE; (6) stripping y precipitación de las REE como oxalatos o carbonatos; y (7) calcinación para producir óxidos de tierras raras (REO) comercializables (Jordens et al., 2013;

Binnemans et al., 2013; Market Review, 2024). Las principales ventajas de esta ruta en relaves potásicos radican en la presencia de apatito bien desarrollado y en la experiencia previa de la industria en flotación de fosfatos, aunque los desafíos incluyen la baja ley inicial y el consumo significativo de reactivos en la etapa hidrometalúrgica (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

Relaves dominados por alteración filica

Los relaves dominados por alteración filica corresponden a material proveniente de zonas donde la ganga está compuesta principalmente por cuarzo, sericita (illita) y abundante pirita, con presencia subordinada de clorita, calcita y fragmentos de roca fuertemente silicificados (Sillitoe, 2010; Richards, 2013). La molienda de estos materiales, al contener una proporción elevada de cuarzo duro y pirita, también genera relaves de granulometría fina, aunque en algunos casos la presencia de sericita y arcillas interestratificadas provoca un aumento de la fracción $<20\ \mu\text{m}$, con consecuencias negativas sobre la sedimentación y filtración (Castro & Sánchez, 2019; Lottermoser, 2010).

Desde el punto de vista geoquímico, los relaves filicos presentan un alto potencial de generación de drenaje ácido debido a su elevada proporción de pirita y a la menor capacidad de neutralización de la ganga, dominada por cuarzo y sericita, que aporta poca alcalinidad (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020). En climas áridos, la oxidación de pirita en superficie puede conducir a la formación de sulfatos solubles, jarosita y schwertmannita, mientras que en condiciones más húmedas la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro (goethita, hematita) puede inmovilizar parcialmente algunos metales, aunque favoreciendo la adsorción de otros (Núñez, 2018; Herrera, 2017). Estas características hacen que los relaves filicos sean críticos desde la perspectiva ambiental y exijan una gestión cuidadosa de drenajes y coberturas.

En términos de mineralogía hospedante de REE, las zonas filicas suelen contener menores cantidades de apatito que las zonas potásicas o propilíticas, pero presentan allanita, titanita y, ocasionalmente, monacita asociadas a venillas de cuarzo y agregados de sericita (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013). Estudios de mineralogía cuantitativa han reportado que las leyes totales de REE en relaves dominados por alteración filica se sitúan típicamente en el rango de 150–300 ppm TREE, con predominancia de LREE (La, Ce, Nd) y menor proporción relativa de HREE (Y, Dy, Tb), reflejando la firma geoquímica de los pórfidos cupríferos andinos (González, 2022; Minerals, 2019; Avilés, 2024).

Reprocesamiento de relaves filicos para recuperación de REE

El reprocesamiento de relaves filicos para REE es técnicamente más desafiante que en el caso de los relaves potásicos, debido a la menor abundancia de apatito y a la fuerte presencia de sericita y arcillas, que afectan la respuesta en flotación y la separación sólido-líquido (Jordens et al., 2013; Castro & Sánchez, 2019). Una estrategia posible consiste en aplicar preconcentración magnética de alta intensidad (WHIMS) para recuperar fases paramagnéticas que incluyan allanita y titanita, seguida de una flotación inversa o directa selectiva según el sistema de reactivos, aunque la eficiencia global y el enriquecimiento en REE suelen ser

menores que en sistemas dominados por apatito (Zhang & Edwards, 2012; Binnemans et al., 2013).

Una vez obtenido un concentrado enriquecido en allanita/titanita, se requiere un tratamiento de "cracking" térmico o alcalino para desestructurar la fase silicatada y facilitar la lixiviación de las REE, proceso que puede implicar tostación con Na_2CO_3 o Na_2SO_4 , seguido de lixiviación ácida o clorurada (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Castor & Hedrick, 2006). Este tipo de ruta, similar a la empleada para monacita y xenotima en depósitos de arenas mineralizadas, es intensiva en energía y reactivos, lo que limita su aplicabilidad económica para relaves con leyes moderadas de REE, salvo que se combinen con la obtención de subproductos adicionales o con esquemas de remediación ambiental que agreguen valor (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022).

Un diagrama de flujo conceptual para relaves fílicos incluiría: (1) clasificación y remoción de fracción muy fina para mejorar la respuesta en separación; (2) WHIMS para recuperar fracción paramagnética enriquecida en allanita/titanita; (3) tostación alcalina del concentrado paramagnético; (4) lixiviación ácida; (5) SX o intercambio iónico para separar REE de Fe, Al y otros metales; y (6) precipitación/calcinación de REO (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013). Si bien técnicamente factible, la principal ventaja de esta ruta radica en su capacidad de tratar fases silicatadas complejas, pero su desventaja es el alto CAPEX y OPEX asociado, lo que la hace más adecuada para relaves con leyes anómalamente altas o dentro de esquemas de I+D piloto (MinMinería, 2022; Market Review, 2024).

Relaves dominados por alteración propilítica

Los relaves dominados por alteración propilítica proceden de sectores periféricos del sistema de pórfido, donde la ganga está compuesta principalmente por clorita, epidoto, calcita, albita y cuarzo, con pirita y calcopirita dispersas en menor proporción que en las zonas potásicas o fílicas (Sillitoe, 2010; Sinclair & Blackwell, 2002). La naturaleza relativamente más blanda de algunos de estos minerales, en particular la clorita y la calcita, produce relaves con una distribución granulométrica algo más gruesa que la observada en los dominios potásicos, con fracciones de arena fina mejor representadas y limos ligeramente menores, lo que favorece la densificación y la estabilidad de los depósitos de relaves (Castro & Sánchez, 2019; Lottermoser, 2010).

Geoquímicamente, los relaves propilíticos exhiben un menor potencial de generación de drenaje ácido que los relaves fílicos, debido a la mayor presencia de carbonatos y minerales con capacidad de neutralización, como calcita y epidoto, que pueden tamponar el pH y reducir la movilidad de metales bajo condiciones oxidantes (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020). No obstante, la presencia de pirita y sulfuros de cobre en menores cantidades sigue exigiendo la consideración de medidas de control de drenajes, sobre todo en depósitos antiguos sin sistemas de drenaje apropiados (Núñez, 2018; Herrera, 2017).

En cuanto a REE, la literatura indica que los dominios propilíticos pueden concentrar tierras raras en epidoto, apatito y, en ciertos casos, clinozoisita y

titanita, reflejando la interacción de fluidos hidrotermales tardíos con rocas volcánicas y sedimentarias de caja (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Richards, 2013). Estudios de relaves propilíticos en el Norte Chico y en la Zona Central han reportado leyes de TREE en el rango de 200–500 ppm, con predominio de LREE (La, Ce, Nd) y una contribución significativa de Y en sistemas con epidoto enriquecido (González, 2022; Avilés, 2024; MinMinería, 2022).

Reprocesamiento de relaves propilíticos para recuperación de REE

El reprocesamiento de relaves propilíticos orientado a la recuperación de REE presenta ciertas ventajas respecto de los relaves filicos, debido a la mayor presencia de minerales como epidoto y apatito, y a mejores propiedades geotécnicas y de sedimentación derivadas de su granulometría algo más gruesa (Castro & Sánchez, 2019; Lottermoser, 2010). Una opción de ruta metalúrgica consiste en una combinación de separación gravimétrica y magnética para concentrar epidoto y apatito, seguida de lixiviación ácida o clorurada para solubilizar las REE hospedadas en estas fases, adoptando esquemas similares a los desarrollados para menas complejas de hierro–apatito (Zhang & Edwards, 2012; MinMinería, 2022).

En este contexto, la separación gravimétrica mediante mesas Wilfley, espirales o concentradores centrífugos puede contribuir a remover la ganga más liviana (cuarzo, albita) y a concentrar epidoto y apatito, mientras que la separación magnética de alta intensidad permite refinar la fracción paramagnética con mayor contenido de REE (Jordens et al., 2013; Abaka-Wood et al., 2018). Posteriormente, la lixiviación ácida con HCl o H₂SO₄, bajo condiciones optimizadas de temperatura y relación sólido–líquido, permite transferir una fracción importante de las tierras raras a solución, aunque la disolución concomitante de Ca, Fe y Al exige etapas de purificación robustas (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022).

Un diagrama de flujo conceptual para relaves propilíticos podría seguir la secuencia: (1) clasificación granulométrica para remover lamas muy finas; (2) separación gravimétrica de alta densidad para concentrar epidoto/apatito; (3) WHIMS para refinar la fracción paramagnética; (4) lixiviación ácida de concentrado; (5) clarificación y SX para recuperar y purificar REE; y (6) precipitación/calcinación de óxidos de tierras raras (Zhang & Edwards, 2012; Jordens et al., 2013). Las ventajas de esta ruta incluyen una mejor respuesta en separación física y la posibilidad de integrar la recuperación de REE con otros subproductos, mientras que las desventajas se vinculan a la complejidad del circuito y al manejo de soluciones cargadas en Ca y Fe (MinMinería, 2022; Market Review, 2024).

4.4.1.1.2 Potencial Económico de la Recuperación de REE desde Relaves de Pórfidos Cupríferos en Chile

La evaluación del potencial económico de recuperar elementos de tierras raras (REE) desde relaves de pórfidos cupríferos en Chile ha adquirido relevancia debido a la creciente demanda internacional por neodimio, praseodimio y disprosio en la fabricación de imanes permanentes, vehículos eléctricos y

turbinas eólicas (IRENA, 2022; Market Review, 2024). Chile posee más de 760 depósitos de relaves, muchos de ellos derivados de grandes yacimientos cupríferos cuyas mineralogías contienen apatito, allanita y monacita como fases portadoras de REE (Sernageomin, 2022; González, 2022).

La viabilidad económica depende de múltiples factores: CAPEX inicial, OPEX operativo, recuperación metalúrgica alcanzable, sensibilidad de precios, riesgos ambientales y modelamiento financiero del Valor Presente Neto (NPV) (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).

4.4.1.1.3 CAPEX de Proyectos de Reprocesamiento de Relaves de Pórfidos Cupríferos

El CAPEX requerido para reprocesar relaves cupríferos orientados a REE incluye infraestructura de recuperación hidráulica, remolienda, flotación selectiva, separación magnética y un circuito hidrometalúrgico para lixiviación y extracción por solventes (SX) (Binnemans et al., 2013).

Estudios aplicados en relaves con apatito en la IV Región estiman que plantas piloto requieren inversiones iniciales entre 30–90 MUSD dependiendo de la escala y del grado de remolienda necesario (González, 2022).

En operaciones industriales, el CAPEX puede superar 200–400 MUSD al incluir espesamiento, relavado hidráulico, sistemas de impulsión, reactores de lixiviación, SX, calcinación y sistemas de tratamiento de efluentes (MinMinería, 2022; IRENA, 2022).

4.4.1.1.4 OPEX Asociado al Reprocesamiento de Relaves

El OPEX está dominado por costos de energía eléctrica para remolienda, reactivos para flotación (hidroxamatos, colectores), reactivos de lixiviación (HCl, H₂SO₄) y solventes para SX (D2EHPA, PC88A) (Jordens et al., 2013).

Proyectos piloto indican costos operativos entre 18–45 USD/t de relave procesado, dependiendo de la dureza mineralógica y la proporción de arcillas (Castro & Sánchez, 2019).

Los reactivos representan el 35–50% del OPEX total y la etapa SX puede alcanzar hasta el 20–30% del costo por la necesidad de purificación de impurezas como Fe, Al, Ca y Mg (Binnemans et al., 2013; Market Review, 2024).

4.4.1.1.5 Recuperación Metalúrgica Alcanzable

La recuperación depende de la abundancia y liberación de apatito, allanita y monacita, así como del tipo de zona de alteración geológica (Jackson & Christiansen, 1993).

Relaves potásicos y propilíticos muestran recuperaciones potenciales de 30–55% de TREE mediante flotación + lixiviación clorurada (González, 2022; Avilés, 2024).

Relaves fílicos tienen recuperaciones menores (10–25%) debido a la presencia de sericita y pirita fina que complica la separación física y exige cracking térmico

para liberar REE desde allanita-titanita (Zhang & Edwards, 2012; Jordens et al., 2013).

4.4.1.1.6 Variables Críticas del Proceso Económico

Las variables que más afectan la viabilidad económica incluyen:

- Ley inicial de REE en relave (ppm de TREE).
- Grado de liberación mineralógica de apatito/allanita (Minerals, 2019).
- Consumo de reactivos hidrometalúrgicos.
- Costos de energía (especialmente remolienda).
- Distancia y bombeo desde el tranque a planta (Sernageomin, 2022).
- Exigencias ambientales y tratamiento de efluentes (SMA, 2020).

En modelos económicos, la ley mínima de corte para REO suele oscilar entre 350–550 ppm TREE para lograr NPV positivo (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

4.4.1.1.7 Riesgos Ambientales

Los principales riesgos ambientales incluyen:

- Drenaje ácido por pirita ultrafina (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020).
- Liberación de aguas residuales con Fe, Al y sulfatos.
- Manejo de residuos de lixiviación y SX.
- Riesgos sísmicos por remoción y remanejo de relaves saturados.

Sin embargo, el reprocesamiento puede reducir pasivos ambientales al disminuir volumen y mejorar estabilidad final del tranque (Sernageomin, 2022; SMA, 2020).

4.4.1.2 Relaves Férricos de la Franja de Hierro de Chile y su Potencial en Elementos de Tierras Raras (REE)

La denominada Franja de Hierro de Chile, que se extiende principalmente entre las Regiones de Atacama y Coquimbo, alberga una serie de yacimientos tipo iron-oxide apatite (IOA) e iron-oxide copper-gold (IOCG), tales como El Romeral, Los Colorados, El Algarrobo y otros cuerpos magnético-apatíticos que han sido explotados históricamente por su contenido de hierro (Fe) y, en menor medida, fosfatos y metales base (Sillitoe, 2003; MinMinería, 2022). Durante décadas, la operación de estos yacimientos ha generado importantes volúmenes de relaves férricos, compuestos principalmente por magnetita, apatito y ganga silicatada, que fueron considerados pasivos mineros sin valor económico adicional más allá del hierro remanente (Zhang & Edwards, 2012; Lottermoser, 2010).

Sin embargo, estudios mineralógicos recientes han demostrado que el apatito asociado a depósitos IOA puede contener concentraciones significativas de elementos de tierras raras (REE), particularmente las tierras raras ligeras (LREE) como La, Ce, Nd y Pr, alcanzando contenidos de varios miles de ppm a nivel de mineral y del orden de cientos de ppm cuando se expresan a nivel de roca o relave (Gupta & Krishnamurthy, 2005; MinMinería, 2022; González, 2022). En este contexto, los relaves férricos de la Franja de Hierro emergen como potenciales fuentes secundarias de REE, en línea con las tendencias

internacionales de aprovechamiento de relaves como recursos críticos para la transición energética (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022).

4.4.1.2.1 Marco geológico y procedencia de los relaves férricos en la Franja de Hierro

Los depósitos IOA de la Franja de Hierro chilena se caracterizan por grandes cuerpos de magnetita–apatito asociados a intrusivos calcoalcalinos y rocas volcánicas andesíticas, desarrollados en un contexto extensional a compresivo en el Cretácico, con fuertes anomalías magnéticas y altas leyes de hierro en mineralización primaria (50–65 % Fe) (Sillitoe, 2003; Espinoza & Campos, 2011). Estos cuerpos, explotados tanto a rajo abierto como subterráneamente, generan minerales de hierro que son chancados, molidos y concentrados mediante separación magnética, dejando como relave una fracción significativa de apatito, ganga silicatada (actinolita, clinopiroxeno, feldespatos, cuarzo) y magnetita fina, junto a otros óxidos y silicatos secundarios (Zhang & Edwards, 2012; Castro & Sánchez, 2019).

La procedencia de los relaves férricos está por tanto íntimamente ligada a la mineralogía primaria de los yacimientos IOA e IOCG, donde el apatito actúa como mineral accesorio principal, y en el que se ha documentado el alojamiento de REE en sustitución isomórfica de Ca y en sitios estructurales específicos, generando firmas geoquímicas enriquecidas en LREE (La, Ce, Nd) y, en algunos casos, Y y HREE (Gupta & Krishnamurthy, 2005; MinMinería, 2022). Durante el beneficio del mineral de hierro, el foco histórico ha estado en maximizar la recuperación de magnetita, sin diseñar circuitos específicos para la recuperación de apatito ni, menos aún, de REE, lo que se traduce en relaves con concentraciones no despreciables de fosfatos y lantánidos (Binnemans et al., 2013; González, 2022).

En Chile, Sernageomin ha registrado múltiples depósitos de relaves asociados a la minería del hierro en la Franja de Hierro, algunos de ellos de gran volumen y antigüedad, donde las condiciones de operación histórica (bajas leyes de alimentación, tecnologías de separación magnética menos eficientes) podrían haber favorecido la acumulación de apatito relativamente rico en REE, incrementando el atractivo de estos relaves como objetivos para estudios de reprocesamiento con enfoque en elementos críticos (Sernageomin, 2020; Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022).

4.4.1.2.2 Granulometría típica y caracterización física

La granulometría de los relaves férricos de la Franja de Hierro está determinada por los requerimientos de liberación de magnetita y, en menor medida, de apatito, en las plantas de concentración de mineral de hierro. En general, las operaciones IOA chilenas han trabajado con tamaños de molienda que permiten liberar magnetita en la fracción aproximadamente 80 % menor a 150–250 μm , resultando en relaves con distribuciones granulométricas dominadas por arenas muy finas y limos, y con fracciones de arcilla relativamente bajas en comparación con relaves cupríferos o auríferos (Castro & Sánchez, 2019; Lottermoser, 2010).

Estudios granulométricos de relaves férricos en el Norte Chico muestran curvas de distribución con D50 en el rango de 60–120 μm y contenidos de fracción <20 μm del orden de 10–25 %, lo que implica condiciones de sedimentación y consolidación relativamente favorables para la estabilidad de tranques, aunque la presencia de partículas laminares de anfíboles y micas puede afectar la permeabilidad y la estructuración interna de los depósitos (Espinoza & Campos, 2011; Castro & Sánchez, 2019). La presencia de magnetita fina y apatito moderadamente liberado en estas granulometrías resulta conveniente desde el punto de vista del reprocesamiento, ya que se reduce la necesidad de remolienda extrema para lograr liberación adicional de las fases portadoras de REE (Zhang & Edwards, 2012; Jordens et al., 2013).

4.4.1.2.3 Comportamiento geoquímico

El comportamiento geoquímico de los relaves férricos está fuertemente influido por su alto contenido de óxidos de hierro (magnetita, hematita) y la presencia de apatito y carbonatos, que en conjunto confieren una capacidad neutralizante y tamponante del pH superior a la de relaves sulfurados típicos (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020). En general, estos relaves presentan bajo contenido de sulfuros (pirita, pirrotita) en comparación con relaves cupríferos o polimetálicos, lo que reduce el potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) y la liberación masiva de metales pesados bajo condiciones oxidantes (Espinoza & Campos, 2011; Núñez, 2018).

La presencia de apatito, carbonatos y silicatos de Ca y Mg genera soluciones de poros con pH cercano a neutro o ligeramente alcalino, donde las REE tienden a permanecer asociadas a las fases sólidas, adsorbidas en superficies de óxidos de Fe o retenidas en la estructura del apatito, limitando su movilidad en condiciones naturales de almacenamiento (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013). No obstante, la exposición prolongada a meteorización y la posible presencia de flujos de agua subterránea pueden favorecer procesos de disolución parcial de apatito y reprecipitación de fosfatos secundarios, alterando la distribución de REE entre fases sólidas y líquidas a lo largo del tiempo (Lottermoser, 2010; Herrera, 2017).

En términos ambientales, los relaves férricos se consideran de riesgo moderado a bajo respecto a DAR, pero su manejo sigue exigiendo monitoreo hidrogeoquímico y control de infiltraciones, especialmente en tranques antiguos o con infraestructura limitada, donde la presencia de elementos acompañantes como U, Th o F asociados a apatito puede introducir consideraciones adicionales de radiotoxicidad o toxicidad química en escenarios de reaprovechamiento industrial (MinMinería, 2022; Sernageomin, 2022; IRENA, 2022).

4.4.1.2.4 Mineralogía de ganga, minerales residuales y fases portadoras de REE

La mineralogía de los relaves férricos de la Franja de Hierro refleja directamente la de sus yacimientos fuente. La ganga dominante está compuesta por actinolita, clinopiroxeno, biotita, feldespatos plagioclasa y potásico, cuarzo y, en algunos casos, epidoto y clorita, mientras que las fases principales de mena en el mineral

de alimentación son magnetita y apatito (Sillitoe, 2003; Espinoza & Campos, 2011). Durante el proceso de concentración, la mayor parte de la magnetita es recuperada, pero una fracción de granos finos, mal liberados o de baja susceptibilidad magnética permanece en el relave junto con el apatito y la ganga silicatada (Zhang & Edwards, 2012; Castro & Sánchez, 2019).

Los minerales residuales presentes en relaves férricos incluyen magnetita fina, apatito, anfíboles, piroxenos, feldespatos y trazas de sulfuros y óxidos de titanio (ilmenita, titanomagnetita), así como minerales secundarios formados durante la meteorización como goethita, hematita fina, arcillas y carbonatos tardíos (Lottermoser, 2010; Herrera, 2017). Los estudios de mineralogía cuantitativa mediante QEMSCAN y SEM-EDS han demostrado que el apatito presente en estos relaves es el principal hospedero de REE, con variaciones en contenido y patrón de distribución de lantánidos entre yacimientos y, en algunos casos, con contribuciones menores de monacita y xenotima asociadas a venillas o inclusiones (Gupta & Krishnamurthy, 2005; MinMinería, 2022; González, 2022).

4.4.1.2.5 Procedencia y leyes típicas

La procedencia de las REE en los relaves férricos de la Franja de Hierro se atribuye principalmente al apatito magmático–hidrotermal que acompaña a los cuerpos de magnetita, en el cual las tierras raras sustituyen a Ca^{2+} y ocupan sitios intersticiales dentro de la estructura fosfática, generando concentraciones de REE totales (TREE) en el mineral del orden de 2.000–5.000 ppm, según distintos estudios de depósitos IOA a nivel global (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Zhang & Edwards, 2012). Cuando se expresan a nivel de roca y, posteriormente, de relave, estas concentraciones se traducen típicamente en leyes de 200–800 ppm TREE, dependiendo de la proporción de apatito en la alimentación y del grado de dilución con ganga inerte (MinMinería, 2022; González, 2022).

En el contexto chileno, investigaciones académicas y levantamientos técnicos de la Franja de Hierro sugieren que los relaves más enriquecidos en REE corresponden a aquellos derivados de yacimientos con altos contenidos de P_2O_5 en el mineral de alimentación, donde el apatito representa una fracción modal significativa y puede concentrar patrones de LREE dominados por La, Ce y Nd, con contribuciones menores de Pr, Sm y Y (MinMinería, 2022; Espinoza & Campos, 2011; González, 2022). De forma orientativa, se han propuesto rangos de 300–600 ppm TREE en relaves IOA de la Franja de Hierro, con distribuciones relativas de aproximadamente 40–50 % Ce, 20–30 % La, 10–15 % Nd y el resto distribuido entre Pr, Sm, Gd y Y, aunque estos valores requieren ser confirmados mediante campañas sistemáticas de muestreo y análisis (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

La presencia de estas leyes, combinada con el gran volumen acumulado de relaves férricos, sugiere que, bajo ciertos escenarios de precio y demanda de REE, la Franja de Hierro podría constituir un recurso secundario estratégicamente relevante, en particular para el suministro de LREE utilizados en imanes permanentes de turbinas eólicas y motores de vehículos eléctricos (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022; Market Review, 2024).

4.4.1.2.6 Propiedades geotécnicas y comportamiento de los depósitos de relaves férricos

Desde una perspectiva geotécnica, los relaves férricos de la Franja de Hierro presentan características intermedias entre relaves gruesos de minas de hierro y relaves finos de minas de cobre, con densidades in situ moderadas, permeabilidades bajas a medias y capacidades de consolidación relativamente buenas debido a la baja proporción de arcillas (Castro & Sánchez, 2019; Lottermoser, 2010). Ensayos de laboratorio realizados en muestras representativas han mostrado ángulos de fricción efectivos comparables o ligeramente superiores a los de relaves cupríferos finos, con cohesiones efectivas bajas y comportamiento drenado relativamente estable bajo condiciones estáticas (Sernageomin, 2020; Sernageomin, 2022).

No obstante, la presencia de capas internas con mayores contenidos de limos y la posible heterogeneidad de deposición a lo largo del tiempo pueden generar planos de debilidad y sectores más susceptibles a la licuefacción bajo cargas sísmicas, por lo que la evaluación de estabilidad de tranques de relaves férricos debe considerar la estratigrafía interna y la historia de operación (Sernageomin, 2020; Núñez, 2018). Desde la perspectiva de proyectos de reprocesamiento, estas propiedades geotécnicas son relevantes tanto para el diseño de recuperación hidráulica del material como para el eventual rediseño de los depósitos remanentes o la construcción de nuevas instalaciones de disposición, integrando criterios de estabilidad y remediación ambiental (Lottermoser, 2010; SMA, 2020).

4.4.1.2.7 Rutas de reprocesamiento para recuperación de REE desde relaves férricos

El reprocesamiento de relaves férricos de la Franja de Hierro para la recuperación de REE se basa, en primera aproximación, en la concentración selectiva del apatito portador de tierras raras y en su posterior tratamiento hidrometalúrgico para transferir las REE a solución, siguiendo esquemas análogos a los utilizados en la industria de fosfatos y en depósitos combinados Fe–P–REE (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Zhang & Edwards, 2012). Las etapas clave incluyen preconcentración física del apatito (flotación, separación gravimétrica y/o magnética), lixiviación ácida o clorurada del concentrado fosfático y extracción por solventes (SX) para la purificación y separación de las REE (Jordens et al., 2013; Binnemans et al., 2013).

En la etapa de preconcentración física, la flotación de apatito a partir de relaves férricos puede realizarse mediante colectores de tipo hidroxamato, ácidos grasos modificados o mezclas de colectores aniónicos y no iónicos, controlando cuidadosamente el pH, la dureza del agua y la presencia de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} que afectan la adsorción de los reactivos (Filippova et al., 2013; Xie, 2014). Esta flotación se ve favorecida por la diferencia de propiedades de superficie entre apatito y la ganga silicatada, así como por la posibilidad de suprimir la flotación de magnetita mediante la aplicación previa de separación magnética de baja intensidad, que retira gran parte de los óxidos de hierro antes de la flotación fosfática (Zhang & Edwards, 2012; Jordens et al., 2013).

Una vez obtenido un concentrado de apatito enriquecido en REE, las rutas de lixiviación contemplan el uso de ácidos fuertes como HCl o HNO₃, que disuelven tanto la matriz de Ca-P como las tierras raras, generando soluciones ricas en Ca, P y REE que requieren etapas de purificación secuenciales para recuperar selectivamente los lantánidos (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013). Alternativamente, se han investigado esquemas de lixiviación clorurada en medio HCl con alta fuerza iónica, que mejoran la solubilización de REE y reducen la precipitación de fases secundarias, aunque también incrementan la corrosividad del sistema y exigen materiales de construcción más resistentes (IRENA, 2022; MinMinería, 2022).

Posteriormente, la extracción por solventes (SX) utilizando extractantes organofosforados como D2EHPA, PC-88A o fosfinas modificadas permite separar las REE del Ca y otros cationes acompañantes, mediante secuencias de etapas de extracción, lavado y reextracción (stripping), ajustadas para obtener fracciones enriquecidas en LREE y, en algunos casos, subdividir la mezcla en grupos ligeros y pesados (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013). Finalmente, las REE se precipitan como oxalatos o carbonatos y se calcina el precipitado para generar óxidos de tierras raras comercializables, integrables a cadenas de suministro globales de imanes permanentes y otros productos avanzados (IRENA, 2022; Market Review, 2024).

Diagrama de flujo conceptual y ventajas según mineralogía

Un diagrama de flujo conceptual para el reprocesamiento de relaves férricos de la Franja de Hierro puede describirse en las siguientes etapas secuenciales: (1) recuperación hidráulica del relave desde el tranque y espesamiento; (2) clasificación granulométrica para remover lamas muy finas que dificultan la flotación; (3) separación magnética de baja y alta intensidad para retirar magnetita residual y concentrar fracciones paramagnéticas enriquecidas en apatito; (4) flotación de apatito con colectores hidroxamato/grasos; (5) espesamiento y filtración del concentrado fosfático; (6) lixiviación ácida o clorurada del concentrado; (7) clarificación y SX para recuperar y purificar las REE; (8) precipitación y calcinación de las REE como óxidos; y (9) manejo y disposición de los residuos sólidos y líquidos remanentes (Zhang & Edwards, 2012; Jordens et al., 2013; MinMinería, 2022).

Las ventajas de esta ruta radican en la fuerte asociación de las REE al apatito, lo que permite enfocarse en una fase mineralógica específica para concentración y tratamiento, aprovechando conocimientos existentes de la industria de fosfatos y reduciendo la complejidad de procesar múltiples fases portadoras, como ocurre en algunos relaves cupríferos o polimetálicos donde las REE se distribuyen entre allanita, monacita y otros silicatos (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013). Además, la baja proporción de sulfuros y la mayor estabilidad geoquímica de los relaves férricos disminuyen el riesgo de generación de DAR durante el reprocesamiento, lo cual constituye un co-beneficio ambiental relevante frente a otros escenarios de re-minería de relaves sulfurados (Lottermoser, 2010; Sernageomin, 2020; SMA, 2020).

Entre las desventajas, se cuentan el potencial alto consumo de ácido y energía en la etapa de lixiviación, así como la necesidad de plantas de SX relativamente complejas para manejar grandes caudales de solución con altas concentraciones de Ca y P, lo que puede impactar significativamente el CAPEX y OPEX del proyecto (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2022; Market Review, 2024). En consecuencia, la viabilidad económica de estos esquemas dependerá de la combinación de ley efectiva de REE en el relave, recuperación metalúrgica alcanzable, escalas de operación y precios futuros de la canasta de REO, aspectos que requieren modelamiento económico detallado para la Franja de Hierro, similar al desarrollado para otros proyectos de reprocesamiento de relaves en Chile (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022).

4.5 Oportunidad estratégica: Potencial de MREC para Chile

En depósitos de tipo apatita–hierro como Bayan Obo en China o los sistemas fosfatados evaluados en Suecia, Brasil y Chile, la composición del MREC está dominada por elementos de tierras raras ligeros (LREE), tales como lanthanum (La), cerium (Ce), neodymium (Nd), praseodymium (Pr) y, en menor proporción, samarium (Sm) y gadolinium (Gd), con fracciones típicas de Ce+La superiores al 60–70 % del TREO total (Wei et al., 2022; MinMinería, 2022). Esta composición condiciona fuertemente el valor económico del MREC, ya que el precio está controlado por el contenido de óxidos magnéticos ($\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Pr}_6\text{O}_{11}$) frente a la masa de óxidos de bajo valor como La_2O_3 y CeO_2 (IRENA, 2022; Adamas Intelligence, 2023).

En algunos documentos y literatura se utiliza el término genérico "mixed rare earth concentrate" (MREC o NREC en ciertas notaciones) para referirse indistintamente a un concentrado carbonatado o a un concentrado hidroxilado; sin embargo, en la práctica industrial el producto estándar para proyectos de arcillas iónicas y relaves es el carbonato mixto, dado que este facilita el transporte y la posterior separación por extracción por solventes (SX) en plantas especializadas, principalmente en China y Europa (USGS, 2024; Aclara Resources, 2023).

Este producto intermedio es aceptado directamente por plantas de separación ubicadas principalmente en China, Malasia, India y Europa, lo que lo convierte en un commodity estratégico (IRENA, 2022).

La demanda global de MREC está fuertemente anclada en la expansión del mercado de imanes permanentes NdFeB y, por extensión, en las trayectorias de electrificación del transporte, despliegue de renovables y automatización industrial impulsadas por la transición energética (IEA, 2024; IRENA, 2022; World Bank, 2020). La naturaleza inelástica de esta demanda, sumada a la concentración geográfica de la capacidad de refinación, produce un entorno en el cual la seguridad de suministro y la diversificación de orígenes pesan tanto como el nivel de precios en las decisiones de inversión de los consumidores intermedios y finales (OECD, 2023; European Commission, 2023).

Para países con recursos geológicos o secundarios (relaves) ricos en REE que evalúan proyectos de MREC, estas dinámicas implican que los estudios de

factibilidad deben modelar escenarios de precio con tendencia estructuralmente alcista, pero al mismo tiempo considerar la incertidumbre asociada a la entrada de nueva oferta y a cambios regulatorios en China y otros grandes actores (USGS, 2025; China MIIT, 2024; Reuters, 2025). La evidencia disponible sugiere que, bajo supuestos razonables de crecimiento de NdFeB y mantención de políticas de descarbonización, el MREC seguirá siendo un producto estratégicamente atractivo para la próxima década, especialmente cuando se obtenga a partir de relaves o residuos con menores costos ambientales y sociales comparados con la minería primaria (Hajdu-Rahkama et al., 2025; SERNAGEOMIN, 2020; Cochilco, 2022; MinMinería, 2022).

El desarrollo de carbonato mixto de tierras raras (MREC) desde relaves férricos chilenos constituye una oportunidad estratégica profundamente alineada con las tendencias globales de transición energética y economía circular (MinMinería, 2022). La presión internacional por diversificar cadenas de suministro y reducir dependencia de China ha vuelto esencial la aparición de nuevos actores capaces de proveer intermediarios de la cadena REE, especialmente carbonatos de alta pureza (IEA, 2025).

Chile presenta condiciones únicas para establecer una industria de MREC, debido a la existencia de relaves férricos con apatita y arcillas ion-adsorption similares a depósitos conocidos de REE en Brasil, China y Myanmar (SERNAGEOMIN, 2020). Estudios geometalúrgicos nacionales muestran que estos relaves contienen REE alojadas en la fracción fina, accesibles mediante lixiviación salina suave (Cochilco, 2023).

Chile también posee infraestructura minera, energéticas y de transporte ya instalada, lo que reduce costos de CAPEX respecto de países que deben construir infraestructura desde cero. Esto replica la ventaja observada en Suecia (ReeMAP), donde relaves de hierro permiten producir concentrados de apatita y REE sin necesidad de minería primaria (LKAB, 2021).

La producción de óxidos separados de tierras raras requiere instalaciones hidrometalúrgicas complejas, usualmente con más de 50–80 etapas de extracción por solventes (SX) y control riguroso de impurezas radiactivas como Th y U (Zhang et al., 2021). Esto implica costos superiores a 1000 MUSD para plantas totalmente integradas, como las operadas por Lynas o Shenghe.

En cambio, producir MREC reduce drásticamente los requerimientos de capital al evitar la separación completa de óxidos individuales. Esto permite a países con recursos pero sin experiencia en refinación entrar competitivamente en la cadena global REE, similar a los modelos observados en Mozambique (Monte Muambe) y Sudáfrica (Phalaborwa) (Rainbow Rare Earths, 2024).

Los proyectos internacionales demuestran que la producción de MREC desde relaves es técnica y económicamente viable, permitiendo a Chile una entrada rápida y competitiva al mercado global sin requerir plantas de separación completas.

Las ventajas competitivas para Chile se articulan en tres planos:

- i. disponibilidad de relaves con volumen y ley suficientes
- ii. infraestructura minera y portuaria consolidada
- iii. políticas de diversificación productiva con un marco institucional que reconoce a las tierras raras como minerales críticos en la transición energética (MinMinería, 2022; Cochilco, 2023).

Al enfocarse en MREC y no en óxidos separados, Chile puede reducir la complejidad tecnológica requerida, externalizando la etapa de separación a países que ya cuentan con capacidad instalada de SX/IX (UNCTAD, 2014).

Desde una perspectiva estratégica, la producción de MREC representa un equilibrio entre captura de valor y viabilidad tecnológica. Si bien la producción de óxidos separados podría capturar márgenes adicionales, exige inversiones muy elevadas en plantas de separación y control radiológico (este tipo de regulación está establecido en la Ley 18.302 y complementado por reglamentos específicos que supervisan el manejo, transporte y disposición de materiales radiactivos)(Ley 18.302, 1984; SERNAGEOMIN, 2018; Cochilco, 2023).

El MREC, en cambio, requiere una hidrometalurgia compleja pero abarcable, y permite firmar contratos de offtake con separadores europeos, asiáticos o norteamericanos, diversificando el riesgo geopolítico y comercial (IEA, 2025; European Commission, 2023).

4.5.1 Uso práctico en evaluación de proyecto y sus limitaciones

La combinación de los tres enfoques anteriores permite construir un rango razonable de precios proyectados para el MREC en horizontes de 2030 y 2040, utilizado como referencia en análisis económicos y de riesgo (IEA, 2024; MarketWatch, 2024; Adamas Intelligence, 2024). Partiendo de un precio base de 13.558 USD/t, representativo de estudios PEA como Monte Muambe, y de valores cercanos a 14.683 USD/t reportados como precios actuales para MREC en el entorno de 2024–2025, se pueden aplicar CAGRs de 6–7 % (escenario moderado) y de 9–10 % (escenario de transición acelerada) para proyectar precios futuros (Altona Rare Earths, 2023, 2025; Rainbow Rare Earths, 2024).

Bajo escenarios moderados de mercado, los precios hacia 2030 se sitúan en torno a 18.200–22.000 USD/t, lo que representa la aplicación directa de un CAGR de 6–7 % sobre los precios base actuales, coherentes con proyecciones de mercado conservadoras (MarketWatch, 2024; WiseGuyReports, 2024). Bajo escenarios energéticos más exigentes, donde se asume un CAGR de 9–10 %, los precios proyectados para 2030 se ubican en el rango de 25.400–27.800 USD/t, reflejando un desbalance más fuerte entre una demanda de REE magnéticas en rápido crecimiento y una oferta de MREC que se expande más lentamente (IEA, 2024; Adamas Intelligence, 2024).

Extendiendo estos CAGRs hasta 2040, los modelos de transición acelerada entregan precios potenciales para el MREC del orden de 60.000–73.000 USD/t, siempre bajo el supuesto de que no se produce una expansión masiva de nueva oferta que compense las tensiones de mercado (IEA, 2024; OECD, 2023; World Bank, 2020). Estos valores deben comprenderse como escenarios de referencia

para análisis de sensibilidad y no como predicciones deterministas, pero son útiles para evidenciar que, en contextos de transición energética ambiciosa, el MREC podría experimentar ciclos de precios estructuralmente altos comparables a los ‘superciclos’ observados históricamente en metales como el cobre o el litio (Cochilco, 2023; UNCTAD, 2014; World Bank, 2020).

Un aspecto central al utilizar estas proyecciones es reconocer sus limitaciones: todas ellas se apoyan en supuestos explícitos sobre la evolución de la demanda de REE, la tasa de entrada de nuevos proyectos, los costos de producción y las políticas industriales de los principales países productores y consumidores (IEA, 2025; European Commission, 2023; OECD, 2023). En particular, una expansión más rápida de lo esperado de proyectos de MREC desde relaves o residuos, como ReeMAP en Suecia, Phalaborwa en Sudáfrica o eventuales proyectos en Chile, podría introducir competencia adicional que modere los precios frente a los escenarios de transición acelerada (LKAB, 2021; Rainbow Rare Earths, 2024; MinMinería, 2022).

Por lo tanto, en la práctica de evaluación de proyectos se recomienda emplear estos rangos no como valores únicos, sino como bases para análisis de sensibilidad y simulaciones Monte Carlo, donde el precio del MREC se modela como una variable aleatoria con distribuciones triangulares o lognormales que capturan la incertidumbre y la asimetría del mercado (Hajdu-Rahkama et al., 2025; Ghorbani, 2025; World Bank, 2020). Este enfoque permite cuantificar el impacto de distintos supuestos de precio en el VAN, la TIR y otros indicadores económicos, aportando una visión más robusta del riesgo asociado a las fluctuaciones de mercado (USGS, 2025; Cochilco, 2022; SERNAGEOMIN, 2020).

La Tabla 33, presenta un conjunto de precios de referencia ilustrativos para un MREC orientado a imanes, obtenidos a partir de canastas de óxidos NdPr, Dy y Tb. Los valores específicos deben ser actualizados con fuentes de mercado especializadas como Asian Metal, Shanghai Metals Market o informes de consultoras; sin embargo, la estructura de escenarios es la que se utiliza habitualmente en estudios económicos (IEA, 2025; World Bank, 2020).

Tabla 33. Precios de referencia para MREC según escenario de proyección de demanda.

Año	Escenario Base (USD/t MREC)	Escenario Transición (USD/t MREC)	Escenario Acelerado (USD/t MREC)	Comentario
2025	14.000	15.500	17.000	Derivado de canasta NdPr con leve prima
2030	18.000	21.000	24.000	Crecimiento moderado o acelerado de demanda NdFeB
2035	22.000	27.000	35.000	Mayor tensión oferta–demanda en escenarios de

				transición rápida
2040	26.000	34.000	45.000	Escenarios acelerados con fuerte penetración de EV y eólica

Estos niveles de precio ilustrativos asumen tasas de crecimiento anual compuesto (CAGR) del orden de 5–7 % en el escenario base, coherentes con proyecciones de mercado para óxidos magnéticos, y entre 8–10 % en escenarios de transición energética acelerada, en línea con modelos de demanda de imanes NdFeB para vehículos eléctricos y turbinas eólicas (Adamas Intelligence, 2024; IEA, 2025).

CAPÍTULO V: BENCHMARK INTERNACIONAL Y KPIs DEL PROYECTO

5.1 Benchmark: Proyectos mundiales comparables con Chile

El uso de un benchmark internacional en estudios de factibilidad para proyectos de MREC desde relaves férrico-apatita es esencial para reducir la incertidumbre asociada a la estimación de costos de capital (CAPEX) y costos operativos (OPEX), así como para definir rangos razonables de recuperación metalúrgica y desempeño ambiental, evitando el sesgo optimista o pesimista que suele surgir cuando se trabaja solo con supuestos teóricos (Abbadi et al., 2024; O'Brien, 2025).

Los modelos financieros clásicos basados en valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) requieren supuestos explícitos sobre inversiones iniciales, costos unitarios y perfiles de producción; cuando dichos parámetros se calibran contra proyectos reales de naturaleza análoga, la distribución de resultados en simulaciones de Monte Carlo refleja de mejor manera el espacio de soluciones que el mercado ha demostrado como viable (O'Brien, 2025; Peelman et al., 2018).

En el caso específico de los relaves, el benchmark permite capturar el hecho de que la minería primaria ya ha incurrido en la mayor parte de los costos de descubrimiento, explotación y conminución, pero que, simultáneamente, se enfrentan desafíos adicionales en términos de re-manejo, estabilidad física, tratamiento de aguas y gestión de impurezas como fósforo, flúor, uranio y torio, todo lo cual debe reflejarse en el CAPEX y OPEX de plantas de reprocesamiento (Abbadi et al., 2024; Mukaba et al., 2021; Ng et al., 2025).

Asimismo, un benchmark robusto es necesario para validar la competitividad del costo caja del MREC producido a partir de relaves frente a proyectos primarios y a otras fuentes secundarias como fosfoyesos, *red mud* y arcillas iónicas, considerando que la literatura ubica a los proyectos más eficientes en rangos de costos del orden de 30 a 60 USD/kg REO para los óxidos magnéticos,

dependiendo de la composición de la canasta y del nivel de integración aguas abajo (Mukaba et al., 2021; USGS, 2025).

Desde la perspectiva de políticas públicas, la alineación con la Estrategia Nacional de Minerales Críticos y con las hojas de ruta de economía circular en minería exige demostrar que los supuestos tecnológicos y económicos del proyecto son consistentes con el estado del arte internacional, de modo que el benchmark también cumple un rol de justificación ante reguladores, bancos de desarrollo y potenciales socios estratégicos (Cochilco, 2023; IRENA, 2024; MinMinería, 2022).

Entre los casos de referencia seleccionados destacan el proyecto Phalaborwa en Sudáfrica, que reprocesa pilas de fosfoyeso enriquecidas en REE; el programa ReeMAP de LKAB en Suecia, enfocado en recuperar apatita y REE desde relaves de hierro; iniciativas de recuperación de REE desde fosfoyeso y apatita a escala industrial o piloto; y proyectos de arcillas iónicas como el Módulo Penco y el proyecto Carina de Aclara, que, aunque no son relaves, comparten el objetivo de producir MREC mediante esquemas hidrometalúrgicos intensivos (Aclara, 2022; Aclara, 2025; LKAB, 2020; Rainbow Rare Earths, 2025).

Complementariamente, se revisan estudios de costo y modelos econométricos para proyectos de REE, que entregan relaciones empíricas entre CAPEX, OPEX y capacidad instalada, así como revisiones de la literatura sobre recuperación hidrometalúrgica de REE desde relaves, residuos y fosfoyesos, lo cual permite enmarcar la discusión de eficiencia de proceso y consumo de reactivos (Abbadi et al., 2024; Ng et al., 2025; O'Brien, 2025; Peelman et al., 2018).

5.1.1 Phalaborwa (Sudáfrica) – Descripción General

Phalaborwa, desarrollado por Rainbow Rare Earths, es el proyecto más avanzado de recuperación de REE desde fosfoyeso, un residuo de la producción de ácido fosfórico. Los depósitos contienen 35 Mt con 0,44% TREO y mineralogía ya parcialmente crackeada debido al tratamiento ácido previo, lo que reduce sustancialmente la energía de lixiviación requerida.

De acuerdo con los estudios económicos publicados, el proyecto contempla procesar del orden de 2,2 Mt/año de fosfoyeso durante una vida útil de alrededor de 16 años, obteniendo un MREC enriquecido en Nd, Pr, Dy y Tb, a partir de un esquema de lixiviación ácida, eliminación de impurezas mayoritarias y posterior precipitación selectiva (O'Brien, 2025; Rainbow Rare Earths, 2025).

El CAPEX inicial actualizado se sitúa en el orden de 250–300 millones de USD, con costos operativos significativamente inferiores a los de un proyecto primario tradicional debido a la ausencia de mina, chancado y molienda, lo que posiciona a Phalaborwa entre los proyectos de REE con mayores márgenes fuera de China (O'Brien, 2025; Rainbow Rare Earths, 2025; USGS, 2025).

Las recuperaciones globales de TREO reportadas en los estudios técnicos superan el 60–70 %, con énfasis en la maximización de los elementos magnéticos, mientras que los principales desafíos se relacionan con el control de radionúclidos, el manejo de sulfatos y la gestión de grandes volúmenes de

soluciones y yeso neutralizado, aspectos que son directamente relevantes para cualquier proyecto basado en matrices fosfatadas (Mukaba et al., 2021; Ng et al., 2025).

5.1.2 ReeMAP (Suecia) – Descripción General

ReeMAP, impulsado por LKAB, es el mayor proyecto europeo de valorización de relaves férricos. Se centra en la obtención de apatita, fósforo y REE desde relaves de minas de hierro-apatita en Kiruna y Malmberget, mediante la producción de un concentrado de apatita a partir del flujo de relaves y su posterior procesamiento químico para generar fertilizantes, fluoruros, yeso y concentrados de REE (Jonsén, 2022; LKAB, 2020; UNECE, 2022).

La estrategia de ReeMAP se basa en instalar plantas de recuperación de apatita asociadas a las plantas de pellets de hierro, tratando del orden de varios millones de toneladas de relaves al año, con el objetivo de producir aproximadamente 50 kt/año de P contenido y una fracción significativa de la demanda europea de REE, lo que ilustra el potencial de los relaves férrico-apatita como fuente secundaria de estos elementos (LKAB, 2020; Phosphorus Platform, 2023).

Desde el punto de vista técnico, ReeMAP demuestra que es posible recuperar apatita de relaves mediante flotación y luego procesarla en un circuito hidrometalúrgico para extraer fósforo y REE, enfrentando desafíos similares a los que existirían en un proyecto chileno en cuanto a manejo de fluoruro, radionúclidos y altas concentraciones de hierro (Jonsén, 2022; Mukaba et al., 2021).

En términos de economía de proceso, LKAB ha destacado que el proyecto se sustenta en la lógica de economía circular y en el uso de energía eléctrica baja en carbono, buscando limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y posicionar el producto como insumo estratégico para fertilizantes y tecnologías limpias, lo que es coherente con los lineamientos de la Unión Europea sobre materias primas críticas (IRENA, 2024; UNECE, 2022).

5.1.3 Proyectos de arcillas iónicas: Módulo Penco y Carina (Aclara)

Los proyectos Módulo Penco (Chile) y Carina (Brasil), ambos de Aclara, se basan en depósitos de arcillas iónicas enriquecidas en REE, los cuales, si bien no son relaves, presentan una mineralogía de baja dureza y partículas finas, y se explotan mediante remoción mecánica y reapilamiento, lo que los hace comparables desde el punto de vista de la ausencia de minería dura y del uso de procesos hidrometalúrgicos intensivos (Aclara, 2022; Aclara, 2025).

En el caso del Módulo Penco, los estudios públicos reportan una producción promedio del orden de 800 t/año de REO contenidos en un MREC de alta pureza, con un CAPEX estimado del orden de 100–150 millones de USD, y un esquema de lixiviación por intercambio iónico con soluciones de sales amónicas, seguidas de purificación y precipitación de carbonatos de tierras raras (Aclara, 2022; Aclara, 2023).

El proyecto Carina, por su parte, presenta una escala mayor, con una producción objetivo superior a 4.000 t/año de REO, con una canasta particularmente rica en

Dy y Tb, utilizando la misma tecnología de *Circular Mineral Harvesting*, lo que permite aprovechar la experiencia adquirida en Chile para un depósito de arcillas iónicas en Brasil (Aclara, 2025; Benchmark Minerals, 2025).

Estos proyectos aportan información relevante sobre especificaciones de producto MREC, purezas superiores al 90 % REO, requerimientos de calidad para la canasta de elementos vendible y la estructura típica de costos en procesos de lixiviación en medio salino y neutralización selectiva, factores que son directamente extrapolables a un proyecto de reprocesamiento de relaves finos que genere un MREC equivalente (Aclara, 2022; Aclara, 2025; Ng et al., 2025).

5.2 Variables clave del benchmark para relaves férrico-apatita

Estudios recientes han incorporado análisis tecno-económicos y de riesgo para estos procesos, concluyendo que, si bien los proyectos pueden ser rentables en una proporción importante de los escenarios analizados, la sensibilidad a los precios de los REE, a los costos de reactivos y a las exigencias ambientales es elevada, por lo que es fundamental incorporar estas variables en modelos de Monte Carlo de factibilidad (Abbadi et al., 2024; Ash et al., 2025; Ng et al., 2025).

Las variables clave identificadas en el benchmark se agrupan en seis bloques principales:

- i. Recurso de relaves: los parámetros más relevantes son el tonelaje disponible de relaves procesables, la tasa de tratamiento anual factible considerando restricciones de ingeniería y permisos, la ley de TREO y la distribución de la canasta de elementos (LREE vs HREE), así como la variabilidad espacial de estas propiedades, que debe ser caracterizada mediante técnicas geoestadísticas para incorporarse adecuadamente a la simulación (MinMinería, 2022; SERNAGEOMIN, 2024; USGS, 2025).
- ii. Mineralogía y características físicas: es crítico determinar en qué fases se hospedan los REE (apatita, monacita, xenotima, adsorción en óxidos de hierro o arcillas), el grado de liberación a los tamaños de partícula presentes en el relave y la presencia de impurezas críticas como P, F, U, Th, Fe y Al que puedan afectar la lixiviación, la extracción por solventes y la precipitación de carbonatos o hidróxidos (Abbadi et al., 2024; Mukaba et al., 2021; Peelman et al., 2018).
- iii. Esquema de proceso y recuperaciones: deben definirse las secuencias unitarias (por ejemplo, flotación de apatita, lixiviación ácida, intercambio iónico, purificación, precipitación y calcinación), los tiempos de residencia, relaciones sólido-líquido, consumos de reactivos y energía, y las recuperaciones metalúrgicas por etapa y global, utilizando como referencia las cifras reportadas para proyectos como Phalaborwa y ReeMAP, así como para esquemas de tratamiento de fosfoyeso (Jonsén, 2022; Mukaba et al., 2021; Rainbow Rare Earths, 2025).
- iv. CAPEX y OPEX: el benchmark permite establecer rangos de inversión específica por tonelada anual de REO, así como fracciones típicas de gasto operativo asignadas a reactivos, energía, mano de obra,

mantenimiento y tratamiento de residuos, lo que es fundamental para estructurar un modelo de costos realista y coherente con la experiencia internacional (Abbadi et al., 2024; Ash et al., 2025; O'Brien, 2025).

- v. Producto MREC y condiciones de mercado: la definición del producto MREC (pureza, composición, niveles de impurezas) y el modelo comercial (venta a terceros o integración aguas abajo), junto con el análisis de precios y volatilidad de la canasta de REE, determinan los ingresos brutos del proyecto y su sensibilidad a escenarios de demanda y oferta de minerales críticos para la transición energética (Gielen, 2022; IRENA, 2022, 2024; USGS, 2025).
- vi. Aspectos ambientales, sociales y regulatorios, cada uno de los cuales condiciona directamente la distribución de resultados económicos del proyecto (Abbadi et al., 2024; Mukaba et al., 2021; O'Brien, 2025).

Desde la perspectiva de políticas públicas, la alineación con la Estrategia Nacional de Minerales Críticos y con las hojas de ruta de economía circular en minería exige demostrar que los supuestos tecnológicos y económicos del proyecto son consistentes con el estado del arte internacional, de modo que el benchmark también cumple un rol de justificación ante reguladores, bancos de desarrollo y potenciales socios estratégicos (Cochilco, 2023; IRENA, 2024; MinMinería, 2022).

5.3 Identificación de factores críticos de éxito

Para alcanzar viabilidad económica, se requieren condiciones óptimas simultáneamente en cinco dimensiones críticas: mineralogía, metalurgia, proceso, mercado y regulación (MinMinería, 2022; IRENA, 2022).

- i. Mineralogía óptima: Relaves con 5–15 % apatito o presencia significativa de monacita bien liberada (Jackson & Christiansen, 1993).
- ii. Recuperación metalúrgica óptima: >40 % mediante preconcentración física + lixiviación eficiente (Jordens et al., 2013; Abaka-Wood et al., 2018).
- iii. Ley óptima de REE: 400–800 ppm TREE en relave, dependiendo del CAPEX (MinMinería, 2022; Market Review, 2024).
- iv. Volumen óptimo: >100 Mt para un proyecto de 5–10 Mt/año para diluir CAPEX (Sernageomin, 2022).
- v. Infraestructura óptima: cercanía a agua, energía y carreteras (<10 km) para reducir costos (Cochilco, 2021).
- vi. Condiciones de mercado favorables: canasta REO >60–80 USD/kg (IRENA, 2022; Market Review, 2024).
- vii. Regulación favorable: permisos claros y uso de estándares GISTM reduce riesgo político y costo de capital (ICMM, 2020).

5.3.1 Integración de variables en el modelo económico de reprocesamiento

La integración de las variables mineralógicas, de proceso, de mercado, ambientales y de riesgo en un modelo económico coherente se realiza comúnmente mediante la construcción de un modelo de flujo de caja descontado

(DCF), donde se calcula el NPV, la IRR y el payback bajo distintos escenarios y se evalúa la sensibilidad de estos indicadores a las principales fuentes de incertidumbre (Davis, 1998; Trigeorgis, 1996). En el caso de reprocesamiento de relaves para REE, este modelo debe incluir explícitamente la evolución de leyes de REE, cambios en recuperación metalúrgica a medida que se avanza en diferentes dominios del relave, variación de precios de la canasta de REO y costos asociados a cumplimiento ambiental y gestión de tranques (Gupta & Krishnamurthy, 2005; MinMinería, 2022).

Modelos avanzados pueden incorporar procesos de reversión a la media en los precios de REE, representar canastas de precios ponderadas por la producción de cada elemento (Nd, Pr, Dy, Tb, etc.) y utilizar escenarios de demanda derivados de proyecciones de penetración de tecnologías bajas en carbono (Nguyen & Lee, 2018; IRENA, 2022).

De esta forma, se evita asumir trayectorias de precios lineales o determinísticas, permitiendo capturar la naturaleza cíclica y, en ocasiones, de “mini superciclos” observada en mercados de minerales estratégicos (Cochilco, 2021; Market Review, 2024).

5.3.2 Comparación técnico-económica con proyectos globales

La toma de decisiones sobre proyectos de reprocesamiento de relaves para REE no puede basarse únicamente en indicadores financieros tradicionales, sino que debe integrar métricas de desempeño ambiental, social y de gobernanza (ESG), así como consideraciones de política pública relativas a la seguridad de suministro de minerales críticos y la contribución del proyecto a objetivos nacionales de descarbonización y desarrollo regional (OECD, 2021; MinMinería, 2022; IRENA, 2022). En este sentido, la evaluación económica se transforma en una herramienta para priorizar proyectos que combinan rentabilidad privada y beneficios públicos, habilitando una minería más circular y resiliente frente a los desafíos de la transición energética.

5.3.2.1 Variable: Tonelaje disponible

El volumen disponible de relaves con potencial para REE es una variable crítica, ya que define la escala del proyecto, la vida útil y la capacidad de diluir costos fijos de CAPEX en el tiempo. En Chile, el catastro nacional de relaves reconoce grandes depósitos asociados a faenas como Chuquicamata, El Teniente, Andina, Los Bronces, División Radomiro Tomic y distritos auríferos y polimetálicos del Norte Chico, donde se han estimado volúmenes del orden de cientos a miles de millones de toneladas, aunque solo una fracción de ellos presenta mineralogías favorables para REE (Sernageomin, 2020; Sernageomin, 2022; MinMinería, 2022).

Desde el punto de vista económico, un volumen insuficiente puede inviabilizar proyectos intensivos en CAPEX, mientras que volúmenes muy altos pero de baja ley pueden requerir estrategias de selección de zonas enriquecidas mediante muestreo sistemático y modelamiento 3D de los tranques de relaves (Castro & Sánchez, 2019; González, 2022).

En Chile, yacimientos de tipo magnetita-apatito como El Romeral, Los Colorados, Cerro Negro Norte y otros cuerpos asociados en la Franja Ferrífera han sido ampliamente descritos por su contenido de Fe, P y REE en apatita (Rojas, 2018; Salazar, 2018; Reich et al., 2020). La literatura internacional reconoce que en depósitos tipo Kiruna la apatita puede contener concentraciones de óxidos de tierras raras del orden de 0,1–1,0 % en peso, generando leyes de TREO en relaves de centenares a algunos miles de ppm, dependiendo de la secuencia de concentración y del grado de liberación de apatita (Palsson et al., 2014; Wanhainen et al., 2017; LKAB, 2023). Casos como Kiirunavaara y Per Geijer en Suecia muestran que los relaves de minas de hierro-apatito pueden constituir recursos REE económicamente relevantes cuando se integran en esquemas de economía circular mineral (LKAB, 2023; Wanhainen et al., 2017).

5.3.2.2 Variable: Recuperación Metalúrgica esperada

La recuperación metalúrgica es uno de los parámetros críticos en la evaluación de proyectos de procesamiento y reprocesamiento de minerales, dado que vincula directamente la ley de alimentación con la producción efectiva del concentrado vendible y, en consecuencia, con los ingresos del proyecto.

En el contexto del reprocesamiento de relaves para la obtención de MREC (mixed rare earth carbonate), la recuperación global de tierras raras totales (TREO) controla de manera casi lineal la cantidad de MREC producida por unidad de tonelada tratada, y por tanto la magnitud de los flujos de caja positivos generados por el proyecto (Araya et al., 2021; Gupta & Krishnamurthy, 2005; IRENA, 2022).

En proyectos de relaves, la recuperación metalúrgica adquiere una relevancia particular porque las leyes iniciales suelen ser bajas (centenares de ppm) y la masa de relave disponible es muy alta, de modo que pequeños cambios en recuperación tienen un impacto significativo en la producción anual de REE y en el Valor Actual Neto (VAN).

Desde un punto de vista económico, la recuperación metalúrgica influye en la viabilidad del proyecto a través de tres mecanismos principales:

- i. incrementa la producción anual de metal vendible para un mismo tonelaje de tratamiento
- ii. mejora el aprovechamiento del recurso disponible, aumentando la vida efectiva o el factor de recobro sobre el stock de relaves
- iii. interactúa con los costos operativos, ya que valores de recuperación elevados suelen requerir circuitos de proceso más complejos, mayor consumo de energía y reactivos y, en algunos casos, etapas adicionales de tratamiento de impurezas (Wills & Finch, 2016; Habashi, 2013; Dagwar et al., 2025).

Por ello, la recuperación óptima no es necesariamente la máxima técnicamente alcanzable, sino aquella que maximiza el VAN o algún otro criterio económico objetivo, como se discute en la literatura de diseño de plantas de procesamiento

y de optimización de circuitos de flotación y lixiviación (King, 2001; Cisternas & Gálvez, 2018; Araya et al., 2021).

En términos prácticos, la recuperación metalúrgica global de un proceso de reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos para REE puede descomponerse en la recuperación de cada etapa unitaria, de modo que $R_{\text{global}} \approx \prod R_j$, donde R_j representa la recuperación de la etapa j (por ejemplo, recuperación en concentración magnética, recuperación en flotación de apatita, recuperación en lixiviación, eficiencia en precipitación y filtración, etc.). Este enfoque multiplicativo resalta el carácter acumulativo de las pérdidas metalúrgicas en un flowsheet con varias etapas, de manera que pérdidas aparentemente “pequeñas” de un 5–10 % en cada unidad pueden traducirse en reducciones sustantivas de recuperación global si no se controlan adecuadamente (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Anderson, 2019; Alemrajabi, 2018). En el caso de tierras raras, donde la hidrometalurgia suele ser compleja y fuertemente condicionada por la química de disolución y precipitación selectiva, la gestión integrada de las recuperaciones parciales es aún más relevante (IRENA, 2022; IEA, 2024; Wübbeke, 2013).

La fracción de REE efectivamente recuperable dependerá entonces de la proporción de apatita liberada en el rango granulométrico de operación, de su comportamiento en las etapas de concentración (p.ej., flotación de apatita) y de su solubilidad en el sistema de lixiviación seleccionado (Alemrajabi, 2018; Valderrama et al., 2024; Palsson et al., 2014).

Una limitación importante en la estimación y uso de la recuperación metalúrgica en estudios de pre-factibilidad de proyectos de reprocesamiento de relaves es la disponibilidad de datos representativos y escalables. Los resultados de pruebas de laboratorio en celdas batch o columnas de lixiviación no siempre capturan la heterogeneidad espacial y textural del relave a escala de depósito, ni los efectos de operación a larga duración (fouling, degradación de reactivos, envenenamiento de catalizadores), lo que puede conducir a sobreestimaciones de la recuperación efectiva (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Habashi, 2013). Por ello, la literatura recomienda incorporar factores de reducción (derating factors) y rangos de incertidumbre amplios en las simulaciones de Monte Carlo, así como avanzar progresivamente hacia pruebas piloto y campañas de muestreo geoestadístico que permitan calibrar mejor las recuperaciones utilizadas en los modelos (SME, 2011; Cisternas & Gálvez, 2018; Dagwar et al., 2025).

Desde el punto de vista del benchmark:

Estudios sobre recuperación de REE desde fosfoyesos y residuos fosfatados reportan recuperaciones globales de TREO típicamente en el rango 60–80 %, dependiendo del lixiviante, cinética y mineralogía (Mukaba et al., 2021; Dev & Ghosh, 2019).

En proyectos como Phalaborwa, las ingenierías conceptuales y la combinación de lixiviación + purificación + precipitación plantean recuperaciones globales meta en torno al 65–75 % para el TREO contenido, con foco en maximizar NdPr

y elementos magnéticos, reconociendo pérdidas inevitables en colas de lixiviación y purificación.

En el caso de arcillas iónicas (p.ej. Módulo Penco, Carina), publicaciones técnicas y presentaciones corporativas mencionan recuperaciones de REE lixiviables usualmente superiores a 70 %, pero con escenarios menos favorables en materiales transicionales o sectores de menor lixiviableidad.

En algunos estudios piloto y de planta demostrativa de proyectos de REE, se reportan recuperaciones globales cercanas o ligeramente superiores al 80 % para ciertos depósitos y flujos de proceso bien afinados, particularmente en matrices de arcillas iónicas y concentrados de apatita con mineralogía muy favorable.

Sin embargo, la mayoría de los autores enfatiza que incrementos adicionales de recuperación por sobre ~85 % suelen requerir incrementos desproporcionados en CAPEX y OPEX, especialmente por mayores consumos de reactivos, complejidad de circuitos de purificación y tasas de recirculación, lo que los hace poco atractivos desde el punto de vista económico (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).

5.3.2.3 Variable: Ley residual de REO

La ley residual de los minerales críticos de interés en un relave, expresada habitualmente como concentración de óxidos de tierras raras (REO) totales (TREO) o como concentración de elementos individuales (Nd, Pr, Dy, Tb, entre otros), constituye el punto de partida para cualquier análisis de viabilidad económica y metalúrgica. Desde el punto de vista metalúrgico, la ley (g/t o ppm) define la cantidad máxima teórica de elemento recuperable por tonelada de relave tratado y, por tanto, determina la masa potencial de MREC que puede producirse a partir del recurso disponible cuando se combina con la recuperación global del proceso (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Araya et al., 2021; Wills & Finch, 2016).

En el caso de relaves férricos ricos en apatita, como aquellos asociados a sistemas iron-oxide apatite (IOA) e iron-oxide copper-gold (IOCG) de la Franja Ferrífera chilena y de análogos como Kiruna en Suecia, la ley residual de REE refleja la concentración de estos elementos en la fase apatítica y en minerales accesorios como monacita, allanita y titanita (Palma et al., 2019; Wanhainen et al., 2017; Reich et al., 2020). Estudios mineralógicos detallados de relaves de Kiirunavaara muestran que las leyes de TREO pueden situarse en el rango de varios cientos de ppm, con distribución de LREE y HREE dependiente de la composición de la apatita y del historial de procesamiento (Wanhainen et al., 2017; Lundberg, 2024). De forma similar, trabajos sobre relaves de minas de hierro-apatita europeas y chilenas indican que la apatita puede contener entre 0,1 y 1,0 % REO, lo que se traduce en leyes de relave que pueden hacer económicamente interesante su reprocesamiento bajo ciertos escenarios de precio y tecnología (Palsson et al., 2014; Alemrajabi, 2018; Valderrama et al., 2024).

Desde la perspectiva económica, diversos estudios han señalado que, bajo tecnologías actuales, las leyes mínimas económicamente explotables de REE totales en recursos secundarios como relaves y subproductos se sitúan típicamente en rangos más altos que en menas primarias, debido al mayor costo unitario asociado al reprocesamiento y a la necesidad de circuitos más complejos (IRENA, 2022; Bagdonas et al., 2022; Chowdhury et al., 2025). Para relaves con REE hospedadas en apatita, algunos análisis de prefactibilidad y revisiones tecnológicas sugieren rangos de ley de corte del orden de 300–600 ppm TREO, dependiendo de la recuperación alcanzable, del precio esperado del MREC y de la estructura de costos de capital y operación (MinMinería, 2022; Market Review, 2024; Araya et al., 2021). Por debajo de este rango, el ingreso generado por unidad de tonelada tratada tiende a ser insuficiente para cubrir el costo total descontado del reprocesamiento, salvo en contextos de precios muy altos o cuando se valoran explícitamente co-beneficios ambientales, como la reducción del riesgo de falla de relaves o la recuperación de otros metales concomitantes (Cochilco, 2022; SERNAGEOMIN, 2023).

En relaves férricos chilenos asociados a la Franja Ferrífera, la ley residual de REE debe analizarse necesariamente en conjunto con la mineralogía y el contenido de apatita, porque ello condiciona la fracción de la ley que es técnicamente recuperable. Investigaciones sobre relaves y concentrados de magnetita-apatita en Chile han demostrado que las tierras raras se concentran en la apatita y, en menor medida, en fases accesorias, de manera que relaves con leyes moderadas pero con alta proporción de apatita y mineralogía relativamente simple pueden ser económicamente más atractivos que relaves de mayor ley pero con REE hospedadas en múltiples fases difíciles de concentrar (Palma et al., 2019; Reich et al., 2020; Valderrama et al., 2024). Este enfoque ajustado por mineralogía ha sido adoptado por MinMinería (2022) y Cochilco (2022) en sus análisis de potencial de minerales críticos en relaves chilenos, donde la ley residual de REE se pondera con la facilidad de recuperación física y química de la fase hospedante.

Una limitación importante en el uso de la ley residual como indicador de viabilidad económica radica en la incertidumbre asociada a su estimación y a su representatividad espacial. Los relaves son, por definición, depósitos heterogéneos y muchas veces mal caracterizados, con variaciones de ley tanto en planta como en profundidad (Marín et al., 2021; SERNAGEOMIN, 2023; Cochilco, 2022). Muestreos puntuales o campañas limitadas pueden sobreestimar la ley media si se centran en sectores enriquecidos o subestimar el potencial si omiten horizontes ricos en apatita o en fases portadoras de REE. Por ello, la literatura recomienda el uso de programas de muestreo sistemático, geoestadística y modelos de bloques de relaves que permitan cuantificar la distribución de la ley residual y su incertidumbre, integrando estos resultados en simulaciones Monte Carlo que evalúen la probabilidad de alcanzar determinadas leyes económicas de corte (Araya et al., 2021; Cisternas & Gálvez, 2018; SERNAGEOMIN, 2023).

5.3.2.4 Variable: CAPEX y OPEX

Las variables de proceso asociadas al gasto de capital (CAPEX) y al gasto operativo (OPEX) constituyen el núcleo del análisis económico de proyectos de reprocesamiento de relaves, ya que determinan tanto la magnitud de la inversión inicial como el costo unitario de tratar cada tonelada de material. En el caso específico de la recuperación de tierras raras desde relaves férricos ricos en apatita, la viabilidad del proyecto depende de equilibrar una alta intensidad de capital —derivada de la necesidad de instalar circuitos de concentración, lixiviación y separación de REE— con costos operacionales suficientemente bajos como para que el margen entre ingresos y egresos genere un Valor Actual Neto (VAN) positivo a las tasas de descuento exigidas por la industria (Gupta & Krishnamurthy, 2005; SME, 2011; Cochilco, 2021; MinMinería, 2022).

Desde una perspectiva de ingeniería de proyectos, el CAPEX en un esquema de reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos incluye típicamente inversiones en:

- sistemas de recuperación hidráulica y transporte de relaves (bombas, piping, espesadores de recirculación)
- remolienda y clasificación para lograr la liberación de apatita y fases portadoras de REE
- concentración física mediante separación magnética y/o flotación de apatita
- circuitos de lixiviación agitada o en pilas para solubilizar las tierras raras
- extracción por solventes (SX) o intercambio iónico para purificar y separar los REE
- etapas de precipitación, filtración, secado y calcinación para producir un MREC comercializable
- manejo de residuos sólidos y líquidos, incluyendo nuevas instalaciones de disposición y plantas de tratamiento de efluentes, además de servicios auxiliares como energía, agua de proceso, aire comprimido e infraestructura civil (Binnemans et al., 2013; Jordens et al., 2013; Dagwar et al., 2025).

Benchmark internacional de proyectos comparables:

1. Rainbow Rare Earths – Phalaborwa (Sudáfrica): Reprocesamiento de 30 Mt de fosfoyeso con apatita → producción de MREC.

CAPEX reportado: 296 MUSD (PEA 2022). Incluye: lixiviación ácida, purificación, precipitación, planta química compleja → Ajustado por escala, un proyecto de 1–3 Mt/año de relaves debería situarse en 200–260 MUSD.

2. LKAB – ReeMAP (Suecia): Recuperación de apatita y REE desde relaves de hierro-apatita.

Inversiones estimadas: 400–500 MUSD (LKAB, 2020; Jonsén, 2022).

Planta química altamente compleja→ Proyectos chilenos más pequeños se ubican por debajo 200–300 MUSD.

3. Aclara – Módulo Penco (Chile): Arcillas iónicas

CAPEX: 130–150 MUSD (NI-43-101). Escala menor, pero circuito químico comparable (IXL, purificación, precipitación)→ Planta de relaves requiere más infraestructura → rango superior: 180–260 MUSD.

4. Aclara – Carina (Brasil): Escala mayor

CAPEX alrededor de 500 MUSD. Similar en complejidad química pero no comparable en tamaño→ Una planta para relaves moderados debe situarse muy por debajo, alrededor 200–300 MUSD.

5. Literatura técnica de plantas hidrometalúrgicas para REE

- Mukaba et al. (2021): costos entre 150–300 MUSD para plantas de lixiviación y purificación de REE.
- Peelman et al. (2018): CAPEX eficiente típicamente entre 120–260 MUSD.
- Dev & Ghosh (2019): rangos de 200–280 MUSD para proyectos piloto escalados a industrial.

El OPEX, por su parte, engloba los costos recurrentes necesarios para operar el sistema a la tasa de tratamiento diseñada. En proyectos de reprocesamiento de relaves para REE, el OPEX se distribuye principalmente entre:

- consumo de energía eléctrica y combustibles (remolienda, bombeo, agitación, aireación)
- consumo de reactivos de concentración (colectores hidroxamatos, depresores, modificadores de pH, espumantes)
- reactivos de lixiviación (ácidos minerales como HCl, H₂SO₄ y HNO₃; sistemas carbonato/bicarbonato; sales cloruro)
- extractantes orgánicos y modificadores usados en SX (por ejemplo, D2EHPA, PC88A, Cyanex 272, mezclas fosfónicas)
- agua de proceso y make-up
- mano de obra directa e indirecta, mantenimiento y suministros
- tratamiento y disposición de efluentes líquidos y residuos sólidos secundarios (Jordens et al., 2013; Binnemans et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Desde la óptica del VAN, el CAPEX actúa como un desembolso inicial que desplaza la curva de valor en el tiempo, mientras que el OPEX condiciona de manera directa el margen por tonelada y, por tanto, la pendiente de los flujos de caja anuales. En este contexto, proyectos con CAPEX elevado pueden seguir siendo atractivos si el OPEX unitario es bajo y la producción de REE es alta, mientras que proyectos con CAPEX moderado pero OPEX elevado pueden

resultar inviables debido a márgenes operacionales insuficientes (Cisternas & Gálvez, 2018; Araya et al., 2021).

El diseño del flowsheet introduce, además, variables económicas indirectas que modifican simultáneamente CAPEX y OPEX. La elección entre rutas de lixiviación ácida (por ejemplo, HCl o H_2SO_4) versus rutas alcalinas/carbonatadas, el eventual uso de etapas de 'cracking' térmico para monacita o allanita, el número de etapas de extracción por solventes y el grado de separación entre REE ligeras (LREE) y pesadas (HREE) afectan la complejidad de la planta, el consumo de energía y reactivos, y el perfil de productos finales (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Binnemans et al., 2013; Harjawidjaja et al., 2020). En general, flowsheets más complejos permiten obtener productos de mayor pureza (por ejemplo, óxidos individuales como Nd_2O_3 o Dy_2O_3) y capturar mayores precios unitarios, pero a costa de mayores CAPEX y OPEX, lo que obliga a evaluar cuidadosamente el trade-off entre valor añadido y costo incremental (IRENA, 2022; Market Review, 2024).

Un aspecto clave en la economía de proyectos de MREC es la decisión sobre la profundidad de transformación del producto. La producción de un concentrado intermedio de REE (por ejemplo, un MREC de 30–50 % REO) destinado a exportación puede realizarse con un CAPEX relativamente menor, al limitar el número de etapas de purificación y separación, y con un OPEX más acotado; sin embargo, los precios realizables son inferiores, ya que el comprador debe asumir el costo y riesgo de la separación final (Jordens et al., 2013; Binnemans et al., 2013). En cambio, la producción de óxidos individuales de alta pureza exige incrementar el CAPEX (más etapas de SX, circuitos específicos para HREE, sistemas de control más sofisticados) y el OPEX (mayor consumo de extractantes, neutralizantes, insumos de calcinación), pero permite capturar precios significativamente superiores en segmentos de nicho como imanes permanentes, fósforos o catalizadores (IRENA, 2022; Adamas Intelligence, 2024; Market Review, 2024).

El proyecto Phalaborwa, desarrollado por Rainbow Rare Earths en Sudáfrica, reporta OPEX estimados entre 25 y 32 USD/t, gracias al aprovechamiento de infraestructura existente y a la estabilidad mineralógica de los fosfoyesos reprocesados (Rainbow Rare Earths, 2023). El proyecto Penco Module en Chile, basado en arcillas iónicas con alto contenido de LREE, presenta costos operativos entre 28 y 35 USD/t, dependiendo del consumo de reactivos y del manejo de agua (Aclara Resources, 2022). Por su parte, el proyecto Carina en Brasil estima un OPEX entre 30 y 40 USD/t en función de variaciones litológicas y de la escala de procesamiento (Aclara Resources, 2024).

La literatura académica ofrece rangos equivalentes. Peelman et al. (2018) indican que los flujos hidrometalúrgicos para REE desde residuos presentan costos operativos típicos entre 20 y 45 USD/t, dependiendo de la complejidad de separación y purificación. Mukaba et al. (2021) estiman costos entre 22 y 38 USD/t para la recuperación de REE desde fosfoyesos, mientras que Dev y Ghosh (2019) reportan valores entre 25 y 40 USD/t para la valorización química de

residuos fosfatados. Jordens, Cheng y Waters (2013), en su revisión sobre procesamiento de minerales portadores de REE, ubican el costo operativo promedio cercano a 30 USD/t para circuitos hidrometalúrgicos con concentración previa.

Las limitaciones y restricciones asociadas a CAPEX y OPEX en el reprocesamiento de relaves férricos con REE son particularmente relevantes en fases tempranas de estudio (scoping, prefactibilidad), donde las estimaciones suelen ser de clase 4 o 5 según las guías de AACE, con incertidumbres del orden de $\pm 30\text{--}50\%$ (SME, 2011; Cisternas & Gálvez, 2018). La ausencia de plantas industriales de referencia para MREC desde relaves en Chile, la variabilidad mineralógica de los depósitos y la dependencia de insumos importados (extractantes, equipos especializados) incrementan el riesgo de desviaciones de CAPEX y OPEX frente a lo proyectado (MinMinería, 2022; Cochilco, 2022). Por ello, la literatura técnica recomienda utilizar rangos amplios para estas variables en simulaciones Monte Carlo y aplicar factores de contingencia y escalamiento basados en benchmarking con proyectos internacionales de REE y de relaves (IRENA, 2022; Bagdonas et al., 2022; Chowdhury et al., 2025).

En el contexto chileno, adicionalmente a las variables puramente técnico-económicas, es necesario considerar restricciones asociadas a disponibilidad de agua, licencias y permisos ambientales, acceso a energía competitiva y aceptabilidad social de nuevos proyectos ubicados en torno a depósitos de relaves existentes (MinMinería, 2022; SERNAGEOMIN, 2023; Pacífico, 2022). La incorporación de tecnologías de eficiencia energética, uso de fuentes renovables (solar, eólica) y esquemas de recirculación de agua pueden reducir OPEX y mejorar el desempeño ambiental, pero en muchos casos requieren un incremento inicial de CAPEX, reforzando la necesidad de considerar el ciclo de vida completo del proyecto en la evaluación económica (IRENA, 2022; IEA, 2024).

5.3.2.5 Variables de mercado: Precio y volatilidad

En proyectos de reprocesamiento de relaves férricos para la obtención de mixed rare earth carbonate (MREC), las variables de mercado asociadas al precio de los óxidos de tierras raras (REO) y a su volatilidad constituyen uno de los focos principales de incertidumbre económica, ya que los ingresos brutos dependen directamente del valor de la canasta de REE vendible y de la proporción relativa de elementos de alto valor, tales como Nd, Pr, Dy y Tb, en dicha canasta (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens, Cheng, & Waters, 2013; IRENA, 2022). A diferencia de otros commodities mineros más maduros, el mercado de REE se caracteriza por una fuerte segmentación por productos (MREC, REO individuales, aleaciones) y por cadenas de valor altamente concentradas geográficamente, lo que amplifica el impacto de decisiones de política industrial, restricciones de exportación y cambios tecnológicos en la trayectoria de precios que enfrenta un proyecto basado en relaves (Binnemans et al., 2013; IEA, 2024).

En el ámbito de la evaluación económica cuantitativa, la influencia de las variables de precio sobre la viabilidad del proyecto se aborda mediante análisis

de sensibilidad y simulación estocástica. En análisis deterministas, es habitual variar el precio de la canasta de REE en rangos de ± 20 –50 % respecto del escenario base y observar el efecto en indicadores como VAN, TIR y período de recuperación, construyendo así curvas de sensibilidad y gráficos de tipo tornado que muestran la jerarquía de impacto de cada variable (Nguyen & Lee, 2018; OECD, 2021; Cochilco, 2021).

Numerosos estudios muestran que para materias primas con intervención estatal, rigideces de oferta y cadenas críticas (como los REE), el proceso más adecuado es mean-reverting:

- Cortés & Struthers (2019), *Resources Policy* – precios de disprosio y neodimio exhiben reversión a la media después de shocks 2010–2012.
- IRENA (2022), *Critical Materials for the Energy Transition* – los REE presentan ciclos inducidos por políticas de oferta, no comportamiento marginal.
- USGS (2023–2025), *Rare Earths Statistics* – los precios retornan a niveles previos cada 2–5 años tras shocks.

Una limitación crítica en la incorporación de precios de REE en evaluaciones de proyectos de MREC desde relaves es la disponibilidad y la calidad de la información de mercado. Esto obliga a recurrir a informes especializados de consultoras, publicaciones técnicas y datos compilados por organismos como USGS, IRENA, IEA y agencias de promoción comercial, los cuales pueden diferir en metodología y horizonte temporal, añadiendo incertidumbre metodológica a la proyección de precios (IRENA, 2022; IEA, 2024; Adamas Intelligence, 2024).

Para un proyecto chileno de MREC desde relaves, periodos en los que los compradores internacionales buscan diversificar suministro fuera de China pueden ofrecer mejores condiciones contractuales, mientras que fases de relajación de restricciones pueden presionar a la baja los precios y hacer más exigentes los requerimientos de costo y calidad (Trade.gov, 2023; MinMinería, 2022).

En el contexto de análisis de riesgo, la volatilidad de precios se integra frecuentemente en decisiones de inversión mediante el uso de metodologías de opciones reales, que permiten capturar el valor de la flexibilidad gerencial para postergar, expandir o abandonar un proyecto según se materialicen escenarios de precio favorables o adversos (Araya et al., 2021; Cisternas & Gálvez, 2018). Bajo este enfoque, el proyecto de MREC desde relaves no se evalúa únicamente sobre la base de un VAN estático, sino también considerando la posibilidad de ajustar la escala de producción, modificar la profundidad de separación (pasar de MREC a REO individuales) o priorizar determinados productos según señales de mercado, lo que puede mitigar parcialmente el riesgo derivado de la incertidumbre de precios de REE (Nguyen & Lee, 2018; IEA, 2024).

En el caso chileno, documentos estratégicos como la Estrategia Nacional de Minerales Críticos y estudios de Cochilco y SERNAGEOMIN destacan que la captura de valor en cadenas de REE requiere no solo conocer el perfil geológico

y metalúrgico de los recursos (incluidos relaves), sino también desarrollar capacidades para gestionar el riesgo de precio y negociar contratos de venta en mercados emergentes de MREC y REO (MinMinería, 2022; Cochilco, 2022; SERNAGEOMIN, 2023). Esto implica articular proyectos de reprocesamiento de relaves con políticas públicas de apoyo a la agregación de valor, promoción de encadenamientos aguas abajo y mecanismos de fomento que permitan absorber parcialmente la volatilidad en fases tempranas de desarrollo de la industria (Chilean Ministry of Mining, 2023; Pacífico, 2022).

5.3.2.6 Variables ambientales y regulatorias

Las variables ambientales y regulatorias introducen costos explícitos e implícitos en proyectos de reprocesamiento de relaves, tanto en términos de inversiones requeridas para cumplir con estándares de diseño y operación de depósitos como en la necesidad de implementar sistemas de tratamiento de aguas, monitoreo y cierre, todo lo cual afecta CAPEX, OPEX y, en algunos casos, los ingresos mediante instrumentos de precio al carbono o incentivos verdes (Lottermoser, 2010; SMA, 2020; MinMinería, 2022).

En Chile, los proyectos de re-minería de relaves deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), cumpliendo con la Ley 19.300 y normativas relacionadas con calidad de aguas, emisiones atmosféricas, residuos peligrosos, seguridad minera y estabilidad física de tranques (MMA, 2020; Sernageomin, 2020).

Desde una perspectiva económica, estos requisitos se traducen en costos adicionales asociados a ingeniería de detalle para rediseño de depósitos, construcción de nuevas instalaciones de disposición, implementación de sistemas de drenaje y control de infiltraciones, monitoreo en tiempo real de estabilidad (piezometría, instrumentación geotécnica), planes de emergencia y participación ciudadana, entre otros (Sernageomin, 2020; SMA, 2020; ICMM, 2020). No obstante, el reprocesamiento puede también generar beneficios económicos indirectos, al reducir el volumen de relaves existentes, mejorar su condición de estabilidad y disminuir obligaciones financieras futuras asociadas a cierre y postcierre, lo que debe ser incorporado explícitamente en el análisis de costo–beneficio (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022; OECD, 2021).

Adicionalmente, el desarrollo de políticas públicas orientadas a minerales críticos y economía circular puede introducir instrumentos de incentivo como créditos tributarios, financiamiento blando, programas de I+D y certificaciones de “producción responsable” que mejoran la percepción de riesgo y el costo de capital de estos proyectos (MinMinería, 2022; IRENA, 2022). La consideración oportuna de estos instrumentos en el modelamiento económico permite reflejar escenarios donde el reprocesamiento de relaves no solo se justifica por retornos privados, sino también por beneficios sociales netos en términos de reducción de pasivos ambientales, generación de empleo y diversificación de la matriz productiva (OECD, 2021; SMA, 2020; MinMinería, 2022).

5.4 KPI Relevantes

5.4.1 KPI: Recuperación Metalúrgica Global (%R)

La Recuperación Metalúrgica Global (%R) se define como la fracción del contenido inicial de óxidos de tierras raras (TREO) en la alimentación que es efectivamente recuperada en el producto final. Su importancia radica en que integra todas las eficiencias de las etapas del proceso, tales como conminución, flotación, separación magnética, lixiviación, extracción por solventes y precipitación final (Avendaño, 2017; Peelman, 2016).

El %R se obtiene mediante balances metalúrgicos que utilizan masas y leyes químicas obtenidas mediante técnicas como ICP-OES e ICP-MS.

La fórmula general de cálculo es:

$$\%R = \frac{(\text{Masa de producto} \times \text{Ley TREO del producto})}{(\text{Masa de alimentación} \times \text{Ley TREO de alimentación})}$$

Estudios de Kotthoff (2020) y Aracena et al. (2015) subrayan la necesidad de caracterizar mineralógicamente los relaves para asegurar valores representativos.

El %R se ve afectado por la mineralogía del relave, la liberación de fases REE y la selectividad de cada operación unitaria. En relaves chilenos estudiados los REE se encuentran mayoritariamente en apatita, lo que condiciona la eficiencia de lixiviación con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o H_2SO_4 (Rasool et al., 2025). Las operaciones de SX y purificación también impactan la recuperación global (Uysal et al., 2020).

El %R determina directamente los ingresos proyectados del proceso, ya que los elementos Nd, Pr, Dy y Tb representan más del 85% del valor económico de la canasta MREC (USGS, 2025; Rainbow Rare Earths, 2024). Meyer et al. (2019) demuestran que variaciones de $\pm 10\%$ en la recuperación pueden significar cambios superiores al 25% en el VAN del proyecto.

Permite identificar cuellos de botella en operación, comparar configuraciones del circuito metalúrgico y optimizar uso de reactivos y energía (Pavez et al., 2018). Es un KPI universalmente utilizado en minería y metalurgia extractiva, lo que facilita comparaciones con proyectos internacionales.

Para proyectos REE basados en relaves, metas razonables son 40–60% de recuperación global, dependiendo del grado de liberación y las condiciones de lixiviación (Avendaño, 2017; Kotthoff, 2020). Un límite crítico inferior se sitúa en 30%, por debajo del cual la mayoría de modelos económicos predicen VAN negativo (Meyer et al., 2019).

5.4.2 KPI: Ley de Concentrado de REE (TREO %)

La Ley de Concentrado TREO (%) se define como la fracción en masa de óxidos de tierras raras totales contenida en el concentrado producido durante el proceso. Matemáticamente, TREO % corresponde al porcentaje en peso de la suma de óxidos de la serie lantánida (La–Lu), itrio y escandio (USGS, 2025). Este KPI refleja el grado de enriquecimiento alcanzado respecto del material

alimentado y está directamente vinculado con la mineralogía del relave, especialmente en sistemas chilenos donde la apatita constituye la fase portadora dominante (Kotthoff, 2020). Su relevancia radica en que concentrados de mayor ley permiten disminuir los consumos de reactivos en etapas de lixiviación y purificación, lo cual impacta significativamente el costo operacional (Peelman, 2016; Meyer et al., 2019).

La medición de TREO % se realiza a través de análisis químicos en laboratorios especializados mediante técnicas de espectrometría tales como ICP-OES e ICP-MS, que permiten cuantificar los óxidos en muestras sólidas y líquidas (Pavez et al., 2018). En el caso de relaves chilenos, SERNAGEOMIN (2015) señala la importancia de preparar las muestras a través de digestiones ácidas completas que aseguren la disolución de fosfatos, carbonatos y minerales refractarios, evitando subestimaciones de TREO. Kotthoff (2020) demostró que el contenido de TREO varía significativamente dependiendo de la microdistribución en apatita y fases accesorias, por lo que la medición debe representar adecuadamente la distribución mineralógica y granulométrica del relave.

El valor de TREO % interviene en diversas etapas del proceso de recuperación. En la preconcentración por flotación, una ley superior permite reducir el tonelaje a lixiviar, disminuyendo así el consumo de H_2SO_4 , NaCl o $(NH_4)_2SO_4$ (Avendaño, 2017; Rasool et al., 2025). En separación magnética, TREO % actúa como criterio para evaluar la eficiencia de remoción de ganga férrica o silicatada (Gronen et al., 2019). En la hidrometalurgia, un concentrado con >4% TREO optimiza la recuperación por lixiviación y la eficiencia del proceso SX (Uysal et al., 2020). El KPI se integra además en modelos económico-financieros, dado que TREO % condiciona el costo químico por tonelada de concentrado tratado y el ingreso potencial del producto (Rainbow Rare Earths, 2024).

En el contexto chileno, Avendaño (2017) y Kotthoff (2020) proponen metas de ley TREO para distintos niveles de madurez del proyecto. Para plantas piloto, una meta razonable es 2–4% TREO en el concentrado inicial. Para operaciones industriales, los valores esperados se sitúan entre 4–8%, dependiendo del grado de liberación y del FE obtenido (Gronen et al., 2019). Proyectos internacionales como Mountain Pass y Ngualla reportan concentrados entre 12–45% (NI 43-101, 2021), pero tales valores corresponden a minerales primarios de alta ley y no a relaves.

5.4.3 KPI: Factor de Enriquecimiento (FE)

El Factor de Enriquecimiento (FE) se define como la relación entre la ley de TREO en el concentrado y la ley de TREO en la alimentación al proceso.

Formalmente:

$$FE = \frac{TREO_{concentrado}}{TREO_{alimentación}}$$

Este KPI indica la eficiencia de la etapa de preconcentración para incrementar el contenido de tierras raras en el producto, reduciendo el volumen a tratar en etapas hidrometalúrgicas posteriores (Pavez et al., 2018). Kotthoff (2020)

demuestra que en relaves chilenos, donde la apatita es la principal fase portadora de REE, los FE típicos se sitúan entre 3 y 10 dependiendo de la liberación mineralógica y selectividad de la flotación.

El FE es crítico porque la eficiencia de preconcentración determina directamente el OPEX químico de la planta. Avendaño (2017) señala que un aumento del FE desde 3 a 6 puede reducir el consumo de reactivos hidrometalúrgicos en más de 40 %. Rasool et al. (2025) indican que sistemas basados en apatita responden mejor a lixiviación cuando el concentrado presenta un FE adecuado, debido a la reducción de ganga carbonatada y silicatada. Meyer et al. (2019) muestran que FE es uno de los parámetros más sensibles en análisis económicos de proyectos REE por su impacto en el tonelaje a lixiviar.

El FE se calcula a partir de mediciones analíticas de TREO obtenidas mediante ICP-OES o ICP-MS en alimentación y concentrado SERNAGEOMIN (2015) enfatiza que el muestreo debe ser representativo para evitar subestimación del FE en relaves heterogéneos.

El FE se integra en la etapa de preconcentración, principalmente flotación y separación magnética. Pavez et al. (2018) detallan que colectores basados en ácidos grasos y hidroxamatos permiten fortalecer la selectividad hacia apatita, incrementando el FE. Gronen et al. (2019) muestran que la liberación mineralógica determina si el FE puede superar el límite de 5 en relaves con apatita recristalizada. Peelman (2016) indica que el FE influye en la lixiviación porque concentrados más limpios mejoran la cinética y disminuyen impurezas que interfieren con procesos SX.

Avendaño (2017) y Kotthoff (2020) proponen $FE \geq 5$ como meta operativa mínima para proyectos piloto basados en relaves férrico-apatíticos. Para operación industrial, $FE \geq 7$ indica un proceso robusto. Meyer et al. (2019) definen $FE < 3$ como un límite crítico que tiende a generar VAN negativo debido al alto costo químico asociado.

5.4.4 KPI: Consumo Específico de Reactivos (kg/t)

El consumo específico de reactivos se define como la cantidad total de reactivo fresco requerido por tonelada de relave alimentado al proceso (kg/t). Se calcula mediante balances de masa considerando entrada, recirculación y pérdidas del sistema.

Formalmente:

$$\text{Consumo Específico } (kg/t) = \frac{\text{Total de reactivo consumido } (kg)}{\text{Total de relave alimentado } (t)}$$

En procesos REE, los reactivos críticos son H_2SO_4 , $NaCl$ y $(NH_4)_2SO_4$ debido a su capacidad para solubilizar REE o facilitar mecanismos de intercambio iónico (Rasool et al., 2025; Uysal et al., 2020).

Cada reactivo desempeña un rol particular dentro del proceso hidrometalúrgico:

- El ácido sulfúrico (H_2SO_4) se utiliza para lixiviación de fosfatos y carbonatos presentes en apatita, aunque requiere control estricto de pH para evitar la precipitación secundaria de sulfatos (Peelman, 2016).
- El cloruro de sodio (NaCl) actúa como agente catalítico para lixiviación clorurada y mejora la solubilización de REE asociados a fases silicatadas (Meyer et al., 2019).
- El sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) es especialmente efectivo en relaves con apatita, ya que genera mecanismos de intercambio iónico similares a los de depósitos ion-adsorption de China (Uysal et al., 2020).

La medición del consumo específico requiere registrar la masa total de reactivos añadidos durante pruebas laborales o campañas de planta piloto. En laboratorio, se determina mediante ensayos de lixiviación con relaciones sólido-líquido definidas y concentraciones controladas (Pavez et al., 2018). En planta piloto o operación industrial, se mide mediante sensores de flujo, caudalímetros y balances en tanques dosificadores (Avendaño, 2017). SERNAGEOMIN (2015) enfatiza la necesidad de corregir consumos debido a neutralización por minerales carbonatados, especialmente calcita y dolomita, comunes en relaves chilenos. Kotthoff (2020) señala que la reactividad de la apatita influye directamente en la demanda de reactivos.

El KPI se integra en varias etapas del proceso metalúrgico. En lixiviación, la demanda de reactivos depende del pH objetivo, temperatura, mineralogía y granulometría del relave (Rasool et al., 2025). En purificación y extracción por solventes (SX), reactivos como bases y sales se añaden para ajustar afinidad iónica y remover impurezas (Uysal et al., 2020). En precipitación de MREC, reactivos como carbonatos o hidróxidos afectan la pureza final del producto (Rainbow Rare Earths, 2024). El KPI está estrechamente relacionado con FE (factor de enriquecimiento), ya que concentrados de baja ley requieren mayor volumen de reactivos hidrometalúrgicos (Meyer et al., 2019).

El consumo de reactivos constituye uno de los principales componentes del OPEX en proyectos REE. Campos (2015) y Avendaño (2017) reportan que este costo puede representar entre 20% y 45% del costo total de operación en Chile. Meyer et al. (2019) señalan que el costo químico es particularmente sensible al grado de liberación y a la selectividad de la preconcentración, por lo que FE y TREO % influyen fuertemente en este KPI. COCHILCO (2022) indica que el costo de reactivos es uno de los factores más críticos para la competitividad en la cadena de valor de REE para transición energética.

La literatura técnica y estudios piloto sugieren metas operacionales de 5–25 kg/t como rango óptimo para relaves apatíticos (Avendaño, 2017; Kotthoff, 2020). Valores cercanos a 10–15 kg/t se consideran eficientes para plantas piloto, mientras que consumos menores a 10 kg/t se consideran altamente competitivos. Para escalas industriales, el objetivo es ≤ 20 kg/t, especialmente bajo esquemas de recirculación de soluciones (Peelman, 2016).

5.4.5 KPI: Consumo Específico de Agua (m^3/t)

El consumo específico de agua se define como el volumen total de agua fresca utilizado para procesar una tonelada de relave. Matemáticamente equivale a:

$$\text{Consumo Específico de Agua } \left(\text{m}^3/\text{t} \right) = \frac{\text{Agua fresca } (\text{m}^3)}{\text{Tonelada de relave tratada (t)}}$$

Este KPI incorpora agua empleada en molienda, slurries, lavado, reposición de pérdidas y purgas. De acuerdo con COCHILCO (2022), las operaciones mineras chilenas han alcanzado promedios entre 0,4 y 1,5 m^3/t dependiendo del nivel de recirculación, clima y tecnología aplicada.

El agua es un insumo esencial en procesos hidrometalúrgicos y de concentración física. En molienda, el agua controla la viscosidad y el transporte del material (Peelman, 2016). En flotación, determina la estabilidad de la espuma y la eficiencia de captura de partículas de apatita portadora de REE (Pavez et al., 2018). En lixiviación, el agua actúa como medio de transporte iónico, afectando la cinética de disolución de apatita y carbonatos (Rasool et al., 2025). La extracción por solventes (SX) requiere agua para etapas acuosas del circuito, y el lavado del precipitado MREC depende del volumen disponible (Uysal et al., 2020).

El consumo se mide mediante balance hídrico integral. Esto implica registrar caudales de ingreso (agua fresca, aguas servidas recuperadas, agua de pozo) y egresos (evaporación, purga, pérdidas en colas, humedad del concentrado). SERNAGEOMIN (2015) recomienda balances mensuales integrados para plantas de procesamiento de relaves. En planta piloto, Avendaño (2017) y Kotthoff (2020) midieron consumos mediante caudalímetros y volumetría directa en estanques. El KPI debe corregirse por humedad del relave, eficiencia de espesadores y capacidad de recirculación del proceso.

El KPI se integra transversalmente en el flowsheet. En molienda y clasificación, determina la proporción de pulpas y afecta el tamaño de equipos (Peelman, 2016). En flotación de apatita, influye en la estabilidad del circuito y en el consumo de reactivos. En lixiviación, la relación sólido-líquido define la eficiencia de la extracción de REE y el volumen de solución que avanza a purificación (Rasool et al., 2025). En SX, altos volúmenes de agua aumentan el costo de equipos y la demanda de extracción orgánica (Uysal et al., 2020). En precipitación de MREC, el agua afecta la pureza del producto final y la calidad del filtrado (Rainbow Rare Earths, 2024).

El consumo específico de agua es uno de los principales drivers ambientales del proceso. COCHILCO (2022) indica que el agua representa un componente crítico en costos operacionales en regiones áridas, especialmente en la zona norte y centro-norte. SERNAGEOMIN (2015) destaca que su reducción disminuye la huella hídrica y facilita la permisología ambiental. Meyer et al. (2019) demuestran que una reducción del consumo desde 1,5 a 0,8 m^3/t puede disminuir el OPEX hasta en un 12% debido a menores costos en bombeo, tratamiento y disposición.

Para procesos de recuperación de REE desde relaves, la literatura y experiencias piloto sugieren metas de consumo hídrico $< 1,5 \text{ m}^3/\text{t}$ (Avendaño, 2017; Kotthoff, 2020). Plantas piloto internacionales operan con $0,6\text{--}1,2 \text{ m}^3/\text{t}$ mediante alta recirculación (Peelman, 2016). Proyectos como Mountain Pass han implementado recirculación $> 92\%$, reduciendo el consumo fresco a $< 0,4 \text{ m}^3/\text{t}$ (NI 43-101, 2021). Para Chile, se considera óptimo operar entre $0,7\text{--}1,3 \text{ m}^3/\text{t}$, dependiendo de la disponibilidad hídrica local.

5.4.6 KPI: Consumo Específico de Energía (kWh/t)

El consumo específico de energía se define como la energía eléctrica total utilizada por tonelada de relave procesado. Incluye tanto energía mecánica (molienda, bombeo, agitación) como energía empleada en sistemas térmicos o auxiliares. Matemáticamente se expresa como:

$$\text{Consumo Específico de Energía} \left(\text{kWh}/\text{t} \right) = \frac{\text{Energía total consumida (kWh)}}{\text{tonelada de relave tratado (t)}}$$

Este KPI captura la eficiencia operativa del proceso, siendo uno de los factores más influyentes en los costos operacionales de plantas metalúrgicas (Peelman, 2016; Meyer et al., 2019).

Procesos de recuperación de REE desde relaves presentan consumos energéticos considerablemente mayores que operaciones convencionales debido a la necesidad de conminución fina, agitación intensiva en lixiviación y etapas adicionales de purificación (Uysal et al., 2020). Meyer et al. (2019) indican que la energía puede representar entre 15% y 35% del OPEX total en proyectos REE. En relaves chilenos, el consumo energético depende del grado de dureza del material, del nivel de preconcentración alcanzado y del tipo de lixiviación aplicada (Avendaño, 2017).

La medición del consumo energético se realiza mediante sistemas SCADA, tableros eléctricos, sensores de potencia y lecturas de motores individuales. SERNAGEOMIN (2015) recomienda medir energía por etapa para identificar cuellos de botella. En laboratorio, el consumo se estima mediante pruebas de Work Index (WI) para molienda y curvas potencia–tiempo (Bond, 1961). En plantas piloto, Avendaño (2017) midió consumos mediante registros de inversores de frecuencia y medidores trifásicos. El KPI debe corregirse por variaciones de humedad, granulometría y recirculación.

El consumo energético se integra en múltiples etapas:

- i. Molienda: el mayor consumidor energético; relaves duros pueden requerir hasta $20 \text{ kWh}/\text{t}$ (Peelman, 2016).
- ii. Flotación: requiere energía para aireación y agitación.
- iii. Lixiviación: agitación mecánica intensiva y control térmico; Rasool et al. (2025) indican consumos variables entre $5\text{--}10 \text{ kWh}/\text{t}$.
- iv. Bombeo y recirculación: especialmente importante en plantas con altas tasas de retorno de soluciones.
- v. Filtración y secado: determinantes para la producción de MREC. Las etapas con mayor sensibilidad energética son molienda y lixiviación.

COCHILCO (2022) enfatiza que la eficiencia energética es uno de los pilares para la competitividad de minerales críticos como los REE, ya que impacta directamente los costos y las emisiones de CO₂. En relaves chilenos, el KPI permite evaluar si la preconcentración física mediante flotación o separación magnética reduce significativamente el consumo energético posterior.

La literatura técnica indica rangos de consumo energético entre 8 y 35 kWh/t para procesos REE dependiendo del diseño del flowsheet (Peelman, 2016; Kotthoff, 2020). Plantas eficientes de lixiviación operan en torno a 10–18 kWh/t. Para Chile, se considera una meta adecuada operar entre 12–25 kWh/t, dependiendo del grado de dureza y del nivel de agitación. Proyectos como Mountain Pass (NI 43-101, 2021) operan con consumos de 20–30 kWh/t debido a molienda fina.

5.4.7 KPI: Capacidad de Tratamiento (t/día)

La capacidad de tratamiento se define como el tonelaje de relave que una planta es capaz de procesar por día bajo condiciones nominales y sin interrupciones significativas. Matemáticamente corresponde al throughput diario, considerando la disponibilidad operacional, el rendimiento de equipos críticos y las restricciones del proceso (SERNAGEOMIN, 2015).

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de Tratamiento } (t/día) \\ = \text{Tasa Nominal o diseño} \times \text{Disponibilidad operacional diaria} \end{aligned}$$

En plantas orientadas a la recuperación de REE, esta capacidad se determina en función del volumen de pulpa manejado, la eficiencia de flotación, la cinética de lixiviación y el dimensionamiento de equipos de extracción por solventes (SX) y precipitación química (Peelman, 2016).

La capacidad de tratamiento determina la escala económica del proyecto, lo cual es particularmente relevante en procesos REE debido al bajo contenido de TREO en relaves y la necesidad de procesar grandes volúmenes para obtener tonelajes significativos de MREC (Kotthoff, 2020). Avendaño (2017) indica que en relaves férrico-apatíticos con leyes entre 0,05% y 0,15% TREO, se requieren capacidades de 2.000–10.000 t/d para lograr una producción económicamente viable. Meyer et al. (2019) enfatizan que el KPI define el CAPEX asociado a molienda, flotación, espesamiento y lixiviación, etapas críticas en REE.

La medición se realiza mediante análisis de throughput real en equipos clave como molinos, celdas de flotación, espesadores, filtros, tanques de lixiviación y reactores SX. En campañas piloto, se define mediante pruebas de tratamiento continuo con monitoreo de densidades de pulpa, tiempos de residencia y caudales volumétricos (Avendaño, 2017). En operación industrial, los sistemas SCADA registran tasas instantáneas y promedio horario, considerando variaciones por alimentación, granulometría y viscosidad de pulpas (Peelman, 2016). SERNAGEOMIN (2015) recomienda validar la capacidad mediante períodos representativos de 72 horas continuas de operación estable.

Este KPI afecta directamente los balances de masa y energía del proceso completo. En molienda, define la potencia instalada requerida. En flotación, determina la cantidad de colectores y espumantes usados por tonelada. En lixiviación, afecta el volumen de reactores, tiempo de residencia, consumo de reactivos y energía. En SX, la capacidad de tratamiento condiciona la cantidad de etapas de extracción, lavado y re-extracción (Uysal et al., 2020). Finalmente, en precipitación de MREC, la capacidad controla la cantidad de reactivo precipitante y la superficie filtrante requerida (Rainbow Rare Earths, 2024).

La literatura y benchmarking internacional sugieren rangos típicos de 100–500 t/d para plantas piloto y 2.000–10.000 t/d para plantas industriales (NI 43-101 Mountain Pass, 2021; Phalaborwa PEA, 2022). Para relaves chilenos, Avendaño (2017) propone iniciar con 250–400 t/d en piloto, escalando a 3.000–6.000 t/d en operación industrial, dependiendo de la geometalurgia del depósito. Proyectos como Penco Module operan cerca de 1.500 t/d con relaves ricos en monacita y apatita, referencia relevante para Chile.

5.4.8 KPI: Disponibilidad Operacional (%)

La disponibilidad operacional se define como la proporción de tiempo en que la planta está lista para operar respecto del tiempo total calendario. Se expresa como:

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Total}} \times 100$$

Este KPI considera detenciones programadas, mantenimientos preventivos, fallas no programadas, contingencias externas y problemas metalúrgicos que impiden continuar la operación (SERNAGEOMIN, 2015). En plantas hidrometalúrgicas REE, la disponibilidad es crítica dado que etapas como lixiviación, extracción por solventes (SX) y precipitación requieren operación continua para mantener sus equilibrios químicos (Peelman, 2016).

La disponibilidad operacional es un indicador estratégico debido a que procesos REE son altamente sensibles a interrupciones. La lixiviación requiere tiempos de residencia continuos para mantener cinética óptima, mientras que SX depende de un flujo estable para evitar saturación del extractante o desequilibrios orgánico-acuoso (Uysal et al., 2020). Kotthoff (2020) enfatiza que detenciones en plantas piloto REE generan sedimentación de pulpas y pérdida de eficiencia, afectando directamente la recuperación metalúrgica global (%R).

La medición de disponibilidad se basa en registros SCADA, reportes de fallas, sistemas CMMS (Computerized Maintenance Management Systems) y hojas de control diario. Avendaño (2017) recomienda mediciones continuas con ventanas de análisis mensuales para plantas piloto, mientras que SERNAGEOMIN (2015) sugiere un horizonte mínimo de 72 horas continuas para validación operativa. La disponibilidad también puede segmentarse en disponibilidad mecánica, eléctrica y de proceso, lo que permite identificar restricciones específicas.

La disponibilidad afecta todas las etapas del flowsheet REE. En molienda, baja disponibilidad provoca variabilidad en la granulometría. En flotación, afecta el

equilibrio de colectores y recuperación de apatita (Pavez et al., 2018). En lixiviación, interrupciones pueden causar precipitaciones indeseadas, disminución de eficiencia y aumento del consumo de reactivos al reiniciar operaciones (Rasool et al., 2025). En SX, detenciones prolongadas exigen reacondicionamiento del extractante (Uysal et al., 2020). En precipitación de MREC, afectan la pureza y estabilidad del producto final.

COCHILCO (2022) destaca que disponibilidad es uno de los KPI más correlacionados con productividad minera, mientras que Meyer et al. (2019) demuestran que mejoras del 3–5% en disponibilidad pueden aumentar significativamente el VAN.

Proyectos hidrometalúrgicos internacionales operan con disponibilidades superiores al 90% (NI 43-101, Mountain Pass, 2021). Para plantas piloto REE, Avendaño (2017) sugiere metas de 85–92%. Para operación industrial en Chile, valores entre 88–94% son realistas, dependiendo del tipo de relave, infraestructura y disponibilidad eléctrica (Kotthoff, 2020). Procesos continuos como SX requieren disponibilidades superiores al 93% para evitar pérdidas en eficiencia (Uysal et al., 2020).

5.4.9 KPI: Costo Operacional Unitario (USD/t)

El Costo Operacional Unitario (OPEX) se define como:

$$\text{OPEX (USD/t)} = \frac{\text{Costos operacionales totales (USD)}}{\text{Toneladas tratadas (t)}}$$

Este KPI incluye costos directos —reactivos, energía, agua, mano de obra, mantenimiento— e indirectos —gestión, servicios generales, control ambiental— (COCHILCO, 2022). En procesos REE, los costos más relevantes suelen ser los derivados de reactivos y energía, pues representan entre 40% y 60% del total (Peelman, 2016; Rasool et al., 2025).

El KPI se utiliza como herramienta central para: evaluar la viabilidad económica del proyecto, comparar alternativas de flowsheet, seleccionar tecnologías de concentración y lixiviación, definir la escala óptima de planta, proyectar ingresos y flujos de caja, analizar la competitividad del proyecto frente a otros productores REE (Meyer et al., 2019).

Avendaño (2017) confirma que, en proyectos con relaves de baja ley, la estimación precisa del OPEX es clave para no sobredimensionar etapas hidrometalúrgicas costosas.

La medición del OPEX requiere recopilar consumos reales de planta o estimaciones de ingeniería:

A. Costos directos:

- Energía: consumo kWh/t en molienda, bombeo, agitación y SX (Peelman, 2016).

- Reactivos: consumo kg/t de H_2SO_4 , NaCl, $(NH_4)_2SO_4$, extractantes SX (Rasool et al., 2025).
 - Agua: pérdidas netas m^3/t , reposición, tratamiento (COCHILCO, 2022).
 - Mano de obra: costos operativos según turnos.
 - Mantenimiento: repuestos críticos, desgaste de equipos.
- B. Costos indirectos: control ambiental, monitoreo y cumplimiento regulatorio (SERNAGEOMIN, 2015), disposición de colas y residuos químicos, servicios generales e insumos auxiliares.

Kotthoff (2020) destaca que la variabilidad mineralógica del relave en Chile obliga a modelos OPEX ajustados a cada depósito.

El KPI se integra a lo largo de todas las etapas del proceso:

- Molienda: Costos dominados por energía y revestimientos (Peelman, 2016).
- Flotación: Colectores, espumantes y acondicionadores determinan el OPEX de esta etapa; Pavez et al. (2018) indican que la optimización del FE reduce los costos posteriores.
- Lixiviación: Etapa más sensible al OPEX: reactivos pueden representar 25–45% del costo total (Rasool et al., 2025), consumo depende del TREO%, FE y mineralogía del relave (Avendaño, 2017).
- Extracción por solventes (SX): Costos asociados a extractantes, diluyentes y regeneración (Uysal et al., 2020).
- Precipitación de MREC: Reactivos alcalinos determinan pureza y costo del producto final (Rainbow Rare Earths, 2024).

Cada etapa aporta componentes específicos al OPEX, lo que permite identificar puntos críticos de optimización.

Controlar el OPEX permite identificar cuellos de botella económicos, evaluar eficiencia energética e hídrica, optimizar consumos químicos, mejorar la competitividad del proyecto frente a China y Australia, justificar inversiones tecnológicas mediante análisis costo–beneficio (COCHILCO, 2022).

Peelman (2016) enfatiza que un OPEX bajo otorga resiliencia frente a la volatilidad del precio REE.

De acuerdo con benchmarking internacional se muestra en la siguiente tabla (Tabla 34):

Tabla 34. Benchmarking internacional para OPEX según tipo de planta.

Tipo de Planta	Meta OPEX (USD/t)	Referencias
Piloto	25–35 USD/t	Avendaño (2017); Kotthoff (2020)
Industrial	15–45 USD/t	Meyer et al. (2019); NI 43-101 (2021)
Alta eficiencia	< 25 USD/t	Peelman (2016)

Para Chile, un OPEX 20–35 USD/t es considerado competitivo dado el costo energético y químico nacional.

Variación del 10% en OPEX → impacto de 5–12% en VAN (COCHILCO, 2022).

El KPI también se incluye en análisis Monte Carlo para cuantificar incertidumbre económica.

5.4.10 KPI: Huella de Carbono (kg CO₂/t)

La huella de carbono se define como la cantidad total de emisiones de CO₂ equivalente generadas para procesar una tonelada de relave, incluyendo emisiones directas (combustión de maquinaria, generación de vapor) e indirectas (electricidad, fabricación de reactivos, transporte) (IPCC, 2021). Este KPI utiliza factores de emisión establecidos por el Ministerio de Energía de Chile y los lineamientos del IPCC para estandarizar los cálculos en la industria minera (Ministerio de Energía, 2023). Para proyectos de REE basados en relaves, este indicador se expresa típicamente en kg CO₂/t de relave procesado, lo que permite comparaciones entre distintas alternativas de diseño y operación (COCHILCO, 2022).

La relevancia estratégica de este KPI radica en que los procesos de recuperación de REE son altamente intensivos en energía eléctrica, reactivos químicos y equipos de alta demanda energética, lo cual contribuye a una huella de carbono más alta que procesos mineros convencionales (Peelman, 2016). Meyer et al. (2019) señalan que, a nivel internacional, los proyectos REE deben demostrar un perfil ambiental robusto para acceder a mercados regulados como la Unión Europea, que exige baja huella de carbono en minerales críticos. Asimismo, para relaves chilenos, la estimación de este KPI es crucial debido a que el país ha establecido compromisos de descarbonización que impactan directamente a la industria minera (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

La medición se basa en estándares internacionales como ISO 14064, GHG Protocol e inventarios del IPCC. Según COCHILCO (2022), para proyectos REE deben cuantificarse:

- A. Emisiones directas (Alcance 1): consumo de combustibles fósiles en maquinaria minera, transporte interno de pulpas y materiales, generación térmica en procesos.
- B. Emisiones indirectas por electricidad (Alcance 2): Se calculan multiplicando el consumo eléctrico total (kWh/t) por el factor de emisión del sistema eléctrico chileno (~0,34 t CO₂/MWh para 2023) (Ministerio de Energía, 2023).
- C. Emisiones indirectas por insumos (Alcance 3): fabricación de reactivos (H₂SO₄, NaCl, (NH₄)₂SO₄), producción de extractantes orgánicos de SX, transporte de insumos y productos, disposición de residuos sólidos y lodos químicos (SERNAGEOMIN, 2015).

Avendaño (2017) reporta que electricidad y reactivos son los principales aportadores de huella de carbono en plantas piloto REE.

Este KPI se integra transversalmente en todas las etapas del flowsheet:

- Molienda: Es la mayor fuente de emisiones por consumo eléctrico intensivo; puede representar más del 50% de la huella total cuando se utiliza energía proveniente de matriz fósil (Peelman, 2016).
- Flotación: Las emisiones provienen principalmente de la fabricación de reactivos colectores y acondicionadores (Pavez et al., 2018).
- Lixiviación: Reactivos como H_2SO_4 , $NaCl$ y $(NH_4)_2SO_4$ tienen factores de emisión elevados, especialmente en procesos con alta relación S/L (Rasool et al., 2025).
- Extracción por solventes (SX): Los extractantes orgánicos poseen huellas de carbono elevadas debido a su compleja síntesis química (Uysal et al., 2020).
- Precipitación de MREC: Requiere reactivos alcalinos ($NaOH$, Na_2CO_3) y etapas de filtración de alto consumo energético (Rainbow Rare Earths, 2024).

La suma de estas etapas determina la huella final del proceso, la cual debe optimizarse mediante mejoras en eficiencia energética y sustitución de reactivos.

Medir y controlar este KPI permite: Optimizar el consumo energético, reduciendo costos y emisiones. Comparar alternativas de diseño metalúrgico con menor impacto ambiental. Cumplir con estándares ESG exigidos por inversionistas (IEA, 2023). Acceder a financiamiento verde y certificaciones de sostenibilidad. Mejorar la competitividad del producto MREC en mercados que penalizan huellas elevadas (Meyer et al., 2019).

COCHILCO (2022) señala que los minerales críticos con baja huella ambiental tendrán ventajas competitivas frente a productores asiáticos.

De acuerdo con benchmarking internacional y nacional, se muestra el resumen de huella de carbono según tipo de planta (Tabla 35):

Tabla 35. Benchmarking de huella de carbono según tipo de planta

Tipo de operación	Meta esperada	Referencias
Planta piloto REE	12–22 kg CO_2/t	Avendaño (2017); Kotthoff (2020)
Industrial basada en relaves	15–25 kg CO_2/t	COCHILCO (2022); Meyer et al. (2019)
Proyectos con alta eficiencia energética	< 15 kg CO_2/t	Peelman (2016)

El uso de energías renovables en Chile permite teóricamente alcanzar huellas significativamente menores que en operaciones REE internacionales como Mountain Pass, cuya huella se sitúa entre 20–40 kg CO_2/t (NI 43-101, 2021).

Los límites se establecen en función del impacto económico y regulatorio:

> **30–35 kg CO_2/t** : indica ineficiencias energéticas o químicas significativas.

> **40 kg CO_2/t** : puede excluir al proyecto de mercados europeos con cumplimiento ambiental estricto (Meyer et al., 2019).

Regulaciones ESG: COCHILCO (2022) propone metas nacionales $< 25 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ para minerales críticos.

Variaciones de $\pm 5 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ pueden modificar en un 3–7% el VAN debido a costos de energía y compensaciones ambientales.

5.4.11 KPI Eficiencia de Revalorización (%)

En su forma más estrictamente metalúrgica, la Eficiencia de Revalorización de Relaves (%) se define como la relación entre la masa de REE (o TREO) efectivamente recuperada en productos (concentrado, solución purificada, MREC u óxidos de tierras raras) y la masa de REE originalmente contenida en el relave tratado, expresada en porcentaje (Peelman, 2016). La formulación típica es:

$$\text{Eficiencia de Revalorización (\%)} = \left(\frac{M_{\text{REE, producto final}}}{M_{\text{REE, relave inicial}}} \right) \times 100$$

donde $M_{\text{REE, recuperada}}$ corresponde a la masa total de REE (o TREO) contenida en los productos finales y $M_{\text{REE, contenida en el relave tratado}}$ corresponde a la masa de REE (o TREO) calculada a partir de la ley del relave y el tonelaje alimentado al proceso (Meyer et al., 2019). En aplicaciones más amplias, el indicador puede extenderse a valor económico recuperado o a indicadores equivalentes de reducción de pasivo ambiental, siempre que se explicita claramente la base de cálculo (COCHILCO, 2022).

La importancia estratégica del KPI radica en que integra en un solo valor el resultado combinado de todas las etapas metalúrgicas: preconcentración, lixiviación, purificación, separación y precipitación (Peelman, 2016). En proyectos REE basados en relaves de baja ley, donde la ley inicial puede situarse entre 0,05 y 0,15% TREO, una fracción relativamente pequeña de ineficiencia en cualquiera de las etapas puede ocasionar pérdidas significativas de valor potencial, reduciendo la competitividad del proyecto (Meyer et al., 2019). Además, a diferencia de un simple indicador de recuperación metalúrgica global, la eficiencia de revalorización permite incorporar explícitamente el hecho de que no todo el relave es tratable, ya sea por limitaciones geotécnicas, ambientales o logísticas (COCHILCO, 2022). Kotthoff (2020) destaca que, en relaves férrico-apatíticos chilenos, la evaluación de eficiencia de revalorización es fundamental para priorizar cuáles depósitos justificarían la implementación de plantas de reprocesamiento.

La medición del KPI requiere tres bloques de información básicos: potencial teórico, masa efectivamente tratada y masa de REE realmente recuperada (Peelman, 2016).

A partir de estos análisis se calcula la masa total de REE contenida en el tonelaje de relave considerado para reprocesamiento (SERNAGEOMIN, 2015). Posteriormente se cuantifica la masa de REE recuperada en concentrados intermedios, soluciones purificadas y productos finales como MREC u óxidos

específicos de Nd, Pr, Dy, entre otros (Uysal et al., 2020). Esta cuantificación se realiza mediante análisis químicos de producto y balances de masa por campaña, integrando la producción acumulada en el periodo de evaluación (Meyer et al., 2019).

Con ambos términos definidos, se calcula la eficiencia de revalorización como:

$$\text{Eficiencia de Revalorización (\%)} = \left(\frac{\sum M_{REE, recuperada}}{\sum M_{REE, relave tratado}} \right) \times 100$$

donde las sumas corresponden a un periodo representativo (por ejemplo, un año de operación piloto o industrial) (COCHILCO, 2022). En algunos casos, se define una variante basada en valor económico, donde en lugar de masa de REE se utiliza valor neto generado (Meyer et al., 2019).

La Eficiencia de Revalorización se integra de manera natural como indicador global de desempeño del flowsheet completo:

- Molienda y clasificación: una molienda insuficiente reduce la cantidad de REE que puede ser transferida a concentrados o soluciones lixiviadas, afectando directamente el numerador de la fórmula (Pavez et al., 2018).
- Preconcentración (flotación, separación magnética): Un FE bajo implica que gran parte del potencial de REE permanece en colas de flotación, reduciendo la eficiencia global de revalorización (Peelman, 2016).
- Lixiviación: representa el punto en el que los REE pasan desde la fase sólida a la solución. La recuperación metalúrgica de lixiviación (porcentaje de REE disuelto respecto del contenido en el alimento a lixiviación) es uno de los factores dominantes en la eficiencia de revalorización (Rasool et al., 2025).
- Purificación, extracción por solventes y separación: determinan qué fracción de los REE disueltos se incorpora en corrientes de alto valor y cuánta parte se pierde en purgas, impurezas o residuos secundarios (Uysal et al., 2020). Una purificación poco selectiva puede reducir notablemente la eficiencia de revalorización, aun cuando las etapas anteriores hayan obtenido recuperaciones elevadas (Meyer et al., 2019).
- Precipitación de MREC y productos finales: pérdidas en esta etapa, ya sea por sobre-neutralización, formación de fases indeseadas o filtración ineficiente, reducen el numerador del KPI (Rainbow Rare Earths, 2024).

La literatura y experiencias de proyectos análogos sugieren los siguientes rangos de referencia:

- Plantas piloto: eficiencias de revalorización global entre 20 y 40%, dado que estas configuraciones suelen estar en desarrollo y no completamente optimizadas (Avendaño, 2017; Kotthoff, 2020).
- Plantas industriales: para justificar el CAPEX de un reprocesamiento de relaves, se consideran deseables eficiencias entre **30 y 60%**,

dependiendo de la ley TREO y de la estructura de costos (Meyer et al., 2019).

- Operaciones altamente optimizadas: proyectos con fuerte integración geometalúrgica y control de pérdidas metalúrgicas pueden alcanzar eficiencias superiores al 60%, especialmente en relaves con mineralogía favorable (Peelman, 2016).

En el contexto chileno, para relaves férrico-apatíticos, diversos estudios plantean que un rango objetivo razonable para justificar inversión se encuentra entre 30 y 50%, dependiendo de la ley media, del precio de la canasta MREC y de los costos químicos y energéticos (COCHILCO, 2022).

Los límites críticos de la Eficiencia de Revalorización pueden establecerse en función de la viabilidad económica y del comportamiento del VAN frente a cambios en el KPI:

< 20%: tiende a asociarse a proyectos marginales, donde la mayor parte del potencial de REE permanece en el relave residual; suele indicar problemas serios de liberación mineralógica, flowsheet insuficiente o costos excesivos (Kotthoff, 2020).

20–30%: puede ser aceptable para relaves de muy baja ley, pero generalmente produce VAN bajo o marginal, especialmente si el OPEX químico es elevado (Meyer et al., 2019).

30–50%: rango típico para proyectos económicamente interesantes, donde existe un equilibrio razonable entre costos y valor recuperado (Peelman, 2016).

> 50%: se asocia a proyectos con alto potencial de rentabilidad y fuerte justificación para escalamiento industrial (NI 43-101, 2021).

COCHILCO (2022) y Meyer et al. (2019) señalan que un incremento de apenas 5 puntos porcentuales en la eficiencia de revalorización puede aumentar el VAN entre un 10 y 15%, especialmente cuando los precios de REE son altos, lo que demuestra la fuerte sensibilidad de los resultados económicos frente a este KPI.

5.4.12 KPI: ÍNDICE DE RIESGO OPERACIONAL (RPN)

Por su nombre en inglés, Risk Priority Number (RPN) se define como:

$$\text{RPN} = \text{Severidad (S)} \times \text{Ocurrencia (O)} \times \text{Detección (D)}$$

Cada categoría se evalúa normalmente en escalas de 1 a 10, donde valores altos indican mayor criticidad (Stamatis, 2003).

- Severidad: impacto de la falla sobre personas, equipos, procesos o medio ambiente.
- Ocurrencia: probabilidad de que la falla ocurra.
- Detección: capacidad de identificar o anticipar la falla antes de que genere consecuencias.

COCHILCO (2022) señala que valores de RPN superiores a 100 requieren intervención inmediata en operaciones mineras chilenas. En el contexto de plantas REE, RPN se usa para identificar puntos vulnerables en lixiviación, SX y manejo de reactivos peligrosos (Avendaño, 2017). El RPN se convierte en un KPI fundamental para priorizar medidas de prevención, asignar recursos y mejorar la disponibilidad operacional (Meyer et al., 2019). Su ventaja estratégica radica en que permite evaluar riesgo de forma cuantitativa en flowsheets complejos y etapas múltiples (Peelman, 2016).

El proceso de medición se realiza en varias etapas:

- A. Se identifican fallas potenciales mediante análisis de procesos, historial operacional, auditorías y revisión de normas (SERNAGEOMIN, 2015).
- B. Asignación de valores numéricos: se evalúa cada modo de falla en tres dimensiones:
 - Severidad (S): impacto en seguridad, ambiente o producción. Ej.: fuga de $H_2SO_4 \rightarrow S = 9$ (Uysal et al., 2020).
 - Ocurrencia (O): frecuencia basada en datos históricos o probabilísticos (Peelman, 2016).
 - Detección (D): capacidad del sistema para predecir o identificar la falla (Stamatis, 2003).

Benchmarking internacional y nacional sugiere, como se muestra en la Tabla 36:

Tabla 36. Benchmarking de índice de riesgo operacional (RPN)

Nivel	RPN	Interpretación
Óptimo	< 60	Riesgo bajo; aceptable sin mitigación inmediata
Aceptable	60–100	Requiere control y monitoreo
Crítico	> 100	Necesita acción correctiva inmediata (COCHILCO, 2022; Stamatis, 2003)
Inaceptable	> 150	Debe suspenderse la operación o rediseñar la etapa

En plantas piloto REE chilenas, Avendaño (2017) reportó RPN entre 80–130 en etapas críticas de lixiviación.

Los límites críticos se definen por seguridad y continuidad operacional:

- RPN > 100: identificado como riesgo operacional crítico en minería chilena (COCHILCO, 2022).
- RPN > 120: asociado a fallas con alto potencial de impacto ambiental o químico (SERNAGEOMIN, 2015).
- RPN > 150: operación debe intervenir o detenerse (Stamatis, 2003).

Un aumento de 20 puntos en el RPN puede reducir la disponibilidad operacional entre 2–5%, impactando el VAN del proyecto (Meyer et al., 2019).

CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA

6.1 Tipo y diseño de investigación

Este estudio adopta un enfoque metodológico cuantitativo y aplicado, orientado a evaluar la factibilidad técnica y económica de producir Mixed Rare Earth Carbonate (MREC) a partir de relaves férrico-apatíticos en Chile. El diseño corresponde a una investigación no experimental de carácter descriptivo–correlacional y basada en modelamiento estocástico.

Se integran series históricas de precios, modelos de simulación y parámetros operacionales para capturar la complejidad del mercado de tierras raras y la variabilidad mineralógica. La aproximación es coherente con metodologías sugeridas por USGS, IEA y estándares de prefactibilidad minera.

La simulación Monte Carlo permite incorporar la incertidumbre en variables clave como el precio del MREC, la recuperación metalúrgica, el CAPEX y el OPEX, generando una distribución de resultados posibles de VAN en lugar de un único valor determinista. Esta aproximación es especialmente útil para proyectos de MREC, donde la volatilidad de precios de tierras raras y la variabilidad geometalúrgica de los relaves pueden afectar significativamente los flujos de caja (Hajdu-Rahkama et al., 2025).

El objetivo de la simulación Monte Carlo es cuantificar la distribución de resultados económicos del proyecto de reprocesamiento de relaves férricos para producción de MREC, incorporando de forma explícita la incertidumbre en las variables clave de ingreso y costos, y estimando métricas de riesgo como la probabilidad de VAN negativo y los percentiles P10, P50 y P90.

6.1.1 Descripción del modelo económico

El modelo económico se fundamenta en el cálculo del flujo de caja libre anual (FCF) a partir de los ingresos proyectados por la venta de óxidos de tierras raras (REO), los costos operacionales unitarios y el cálculo del valor presente neto (NPV). Este enfoque es estándar en la evaluación de proyectos mineros, tal como lo establecen Cochilco (2021) y AACE International (2020).

Fórmulas principales utilizadas:

- i. Ingresos: $\text{Ingresos} = \text{Ton}_{\text{año}} \times (\text{ppm}/1000) \times \text{Recuperación} \times \text{Precio}_{\text{REO}}$
- ii. OPEX total anual: $\text{OPEX}_{\text{total}} = \text{Ton}_{\text{año}} \times \text{OPEX}_{\text{unitario}}$
- iii. Flujo de caja libre: $\text{FCF} = \text{Ingresos} - \text{OPEX}_{\text{total}}$
- iv. $\text{VAN} = -\text{CAPEX} + \sum (\text{FCF}_t / (1+r)^t)$

El Valor Actual Neto (VAN o NPV, por sus siglas en inglés) es el indicador estándar para evaluar la viabilidad económica de proyectos de MREC. Se calcula como la suma de los flujos de caja libres futuros descontados a una tasa que refleja el costo de capital y el riesgo del proyecto. La expresión general es:

$$\text{VAN} = \sum_{t=1}^n \left[\frac{\text{FCF}_t}{(1+r)^t} \right] - \text{CAPEX}_{\text{inicial}}$$

donde FCF_t es el flujo de caja libre en el año t y r es la tasa de descuento (Damodaran, 2012).

La vida útil se determina por el tonelaje de relave disponible y por la capacidad anual de la planta (O'Brien, 2025).

Es habitual considerar un periodo de construcción de 2–3 años en el que se incurre en CAPEX sin generación de ingresos, seguido de una rampa de producción de 1–2 años hasta alcanzar capacidad nominal. Estos detalles se incorporan en el modelo económico para representar mejor el perfil de riesgo del proyecto (O'Brien, 2025).

6.2 Variables críticas del estudio

Sobre la base geológica y metalogénica, el primer paso metodológico del presente análisis consistió en seleccionar, a partir del Catastro de Depósitos de Relaves y del Registro Geoquímico de SERNAGEOMIN, aquellas regiones del norte de Chile con mayor probabilidad de albergar relaves asociados a sistemas IOA–IOCG, es decir, relaves con mineralogía férrico-apatítica y contenido significativo de P_2O_5 y Fe_2O_3 . El análisis preliminar, sustentado en la ubicación de los principales distritos de hierro-apatito y en la distribución de relaves reportada por Marín et al. (2021), permitió acotar la evaluación a las regiones de Atacama y Coquimbo, ambas ubicadas en la Franja Ferrífera y con abundantes instalaciones de relaves derivados de la explotación histórica de minerales de hierro y cobre (Cochilco, 2022; SERNAGEOMIN, 2023).

Una vez definidas Atacama y Coquimbo como regiones de interés, se procedió a construir un subconjunto de depósitos a partir de los datos geoquímicos públicos de SERNAGEOMIN y de información complementaria proveniente de estudios académicos y de la industria. Para cada depósito se consideraron las variables: (i) tonelaje total estimado del relave, (ii) concentración promedio de TREO (ppm) en la fracción fina, (iii) contenido de P_2O_5 y Fe_2O_3 como proxies de la abundancia de apatita y mineralización férrica, y (iv) mineralogía detallada cuando estaba disponible (SERNAGEOMIN, 2023; Valderrama et al., 2024). Esta integración de datos permitió discriminar entre relaves derivados principalmente de pórfidos cupríferos y aquellos asociados a mineralización tipo IOA/IOCG, priorizando estos últimos por su mayor probabilidad de contener REE hospedadas en apatita.

Como criterio de corte económico preliminar, se adoptó un umbral mínimo de concentración promedio de tierras raras totales (TREO) superior a 200 ppm para considerar un depósito o conjunto de depósitos en la evaluación de potencial de reprocesamiento. Este valor corresponde a aproximadamente 0,02 % en peso de óxidos de REE y se ubica en el rango inferior de leyes reportadas para relaves de minas de hierro-apatito y arcillas iónicas que han sido evaluados para recuperación de REE como subproducto (Wanhainen et al., 2017; Dagwar et al., 2025; IRENA, 2022). Diversos análisis tecno-económicos indican que, para proyectos de reprocesamiento de relaves, leyes del orden de 200–500 ppm TREO pueden alcanzar viabilidad cuando se combinan con altos tonelajes y flujos de proceso relativamente simples, especialmente si los REE se concentran

en una fase mineralógica claramente identificable como la apatita (Palsson et al., 2014; Valderrama et al., 2024).

Coquimbo	tonelaje	Fe2O3(%)	P2O5(%)	La(g/t)	Ce(g/t)	Pr(g/t)	Nd(g/t)	Sm(g/t)	Eu(g/t)	Gd(g/t)	Tb(g/t)	Dy(g/t)	Ho(g/t)	Er(g/t)	Tm(g/t)	Yb(g/t)	Lu(g/t)
Suma	6544938694	7229,49	185,60	12219,18	18844,57	2395,31	9735,38	2053,49	628,59	1907,96	261,90	1491,34	295,98	854,91	120,54	776,33	116,13
Promedio	11226309,9	12,40	0,32	21,10	32,32	4,11	16,70	3,52	1,08	3,27	0,45	2,56	0,51	1,47	0,21	1,33	0,20
Min	1	1,41	0,05	0,63	4,32	0,51	1,83	0,37	0,09	0,34	0,05	0,32	0,07	0,21	0,03	0,17	0,01
Max	1700000000	57,18	6,97	585,24	331,55	43,97	164,71	28,48	11,11	26,91	3,15	16,52	3,25	9,48	1,3	7,87	1,31

Atacama	Tonelaje (t)	Fe2O3(%)	P2O5(%)	La(g/t)	Ce(g/t)	Pr(g/t)	Nd(g/t)	Sm(g/t)	Eu(g/t)	Gd(g/t)	Tb(g/t)	Dy(g/t)	Ho(g/t)	Er(g/t)	Tm(g/t)	Yb(g/t)	Lu(g/t)
Suma	557550	421,26	4,38	231,31	490,36	58,01	221,21	43,13	11,83	39,58	5,37	31,77	6,13	18,53	2,71	18,42	2,91
Promedio	19225,862	14,526	0,151	7,976	16,909	2,000	7,628	1,487	0,408	1,365	0,185	1,096	0,211	0,639	0,093	0,635	0,100
Min	375	2,11	0,06	0,59	4,01	0,54	2,28	0,55	0,11	0,39	0,08	0,31	0,07	0,27	0,03	0,32	0,04
Max	73500	60,36	0,38	36,88	64,7	6,66	18,95	3,25	1,1	3,14	0,41	2,25	0,43	1,31	0,24	1,43	0,22

El análisis regional indica que Coquimbo presenta, a escala de clúster, una suma de toneladas de relaves ferríco-apatíticos con leyes de REE por sobre el umbral adoptado y con contenidos de apatita suficientes para sustentar esquemas de concentración y lixiviación orientados a producir MREC, todo ello en un contexto con infraestructura portuaria y energética consolidada (Cochilco, 2022; Ministerio de Minería, 2022). Adicionalmente, la región exhibe una alta densidad de depósitos según el catastro de SERNAGEOMIN, lo que favorece la configuración de un proyecto tipo hub de reprocesamiento que integre varios tranques en un mismo circuito de proceso, análogo a las estrategias de economía circular minera observadas en Planta Magnetita y en plantas internacionales de retratamiento de relaves (CMP, 2012; Pan African Resources, 2020; Weir Group, 2023).

Por estas razones, y sin perjuicio de que Atacama continúa siendo una región relevante en términos de recursos férrico-apatíticos, se optó por focalizar el modelamiento económico detallado y la simulación Monte Carlo en la región de Coquimbo. Esta decisión se fundamenta en que, a simple vista y bajo los criterios cuantitativos aplicados, Coquimbo ofrece el mayor potencial económico ajustado por ley y mineralogía entre las regiones analizadas, maximizando la probabilidad de diseñar un proyecto de reprocesamiento de relaves REE-férrico-apatíticos técnicamente factible y financieramente atractivo en el contexto de la estrategia nacional de minerales críticos y de los objetivos de reducción de pasivos ambientales asociados a relaves.

6.2.1 Ley de MREC (TREO)

Dado que los relaves de origen apatítico contienen tierras raras principalmente alojadas en fases fosfatadas (apatito) o asociadas a óxidos de Fe–Ti, cada depósito evaluado presenta variabilidad significativa en la abundancia relativa de cada elemento (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Y, etc.). Para obtener una medida integrada y comparable entre depósitos, se construyó la variable TREO siguiendo la convención geoquímica reportada por USGS, IRENA y múltiples estudios mineralógicos.

Para cada depósito de relave de la región de Coquimbo:

$$TREO = \sum_{i=1}^n \left(ppm_i \times \frac{M_{\text{óxido},i}}{M_{\text{metal},i}} \right)$$

donde:

ppm_i = concentración del elemento REE i en la muestra,

$M_{\text{óxido},i}$ = masa molar del óxido correspondiente (ej. CeO_2 , La_2O_3 , Nd_2O_3),

$M_{\text{metal},i}$ = masa molar del elemento metálico.

Esto se justifica dado que los REE se comercializan y reportan industrialmente como óxidos (MREC/REO), por lo cual la conversión es coherente con estándares internacionales (Gupta & Krishnamurthy, 2005; IEA, 2022; USGS, 2024). En depósitos de relaves, la suma ponderada permite integrar la contribución real al producto final MREC, evitando sesgos hacia elementos masivos como Ce y La (Kotthoff, 2020; Aracena et al., 2018)

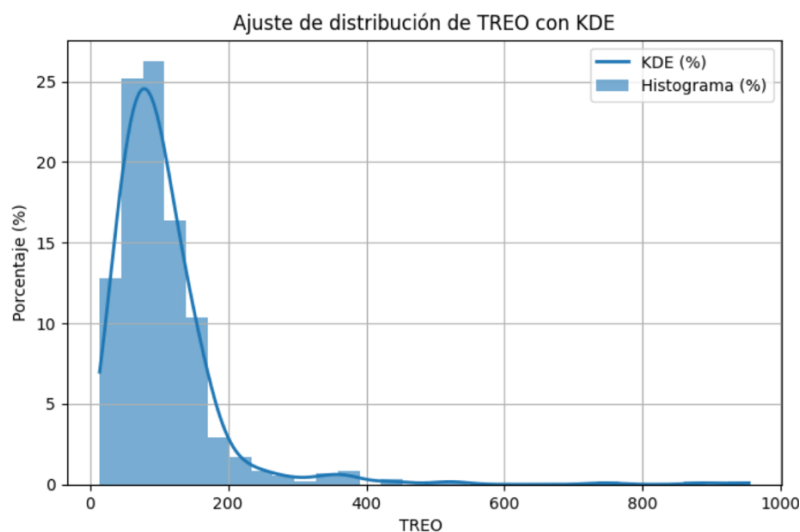
Una vez calculada la columna de TREO para cada muestra de cada depósito, se modeló compararon diversas distribuciones comúnmente utilizadas en minería y geoquímica para

Para representar la distribución de las leyes de TREO se utilizó estimación de densidad por núcleos (KDE, Kernel Density Estimation), en lugar de asumir a priori una familia paramétrica (por ejemplo, lognormal). La KDE es un método no paramétrico ampliamente recomendado cuando la forma de la distribución subyacente es desconocida, potencialmente multimodal o asimétrica, y se busca que los datos “hablen por sí mismos” respecto de la función de densidad, reduciendo el sesgo asociado a imponer una forma funcional específica (Silverman, 1986; Sheather, 2004; Botev, Grotowski, & Kroese, 2010). En estudios geoquímicos recientes, la KDE se ha utilizado de manera sistemática para describir distribuciones de concentraciones, edades y firmas geoquímicas sin imponer normalidad, permitiendo capturar colas y modos asociados a distintos subpoblaciones de datos (Geranian, 2020; Peng et al., 2025; Martyna et al., 2018).

En este trabajo, la KDE se ajustó sobre un intervalo truncado entre 300 y 900 ppm de TREO, coherente con el criterio de selección aplicado al conjunto de relaves estudiados. A partir de la base geoquímica de SERNAGEOMIN, se filtraron únicamente aquellos depósitos con alta concentración de apatita (P_2O_5) y contenidos de REE sobresalientes, en línea con metodologías previas de caracterización de relaves que priorizan depósitos enriquecidos en elementos de valor para estudios detallados (Aracena, Triviño, & Rayo, 2015; SERNAGEOMIN, 2017; CAMCHAL-BGR, 2013). De este modo, las observaciones por debajo de 300 ppm o por encima de 900 ppm se interpretan como valores no representativos de la población objetivo (relaves férrico-apatíticos con potencial económico en REE) o como outliers extremos, por lo que la densidad estimada se definió explícitamente sobre el soporte [300, 900] ppm. El uso de KDE en un rango acotado es consistente con la literatura estadística

sobre densidades con soporte limitado y con aplicaciones donde la variable está condicionada a un proceso de selección previa (p. ej., cortes de ley o “cut-offs” geoquímicos), evitando mezclar en la misma distribución relaves marginales sin interés económico con relaves enriquecidos que son el foco del estudio (Silverman, 1986; Botev et al., 2010).

El ajuste realizado y las distribuciones de las leyes de REO en Python se muestra en el siguiente gráfico :



El gráfico muestra una distribución fuertemente asimétrica hacia la derecha (right-skewed), donde la mayor concentración de datos se localiza en la zona de bajas a medias leyes, entre aproximadamente 40 y 200 ppm, con una moda cercana a los 100–120 ppm, lo cual concuerda con la mineralogía típica de relaves de apatita con contenidos moderados de elementos de tierras raras.

La KDE suaviza la curva del histograma y permite observar la forma continua de la distribución: exhibe un máximo pronunciado (pico de densidad) en torno al rango ya señalado y una larga cola derecha que se extiende hasta valores cercanos a 900 ppm. Esta cola implica la existencia de pocas muestras con leyes significativamente superiores al promedio, representando relaves o sectores del depósito donde la concentración de apatita o monacita es mayor. Sin embargo, estas observaciones corresponden a casos aislados y no representan el comportamiento dominante.

El hecho de que la densidad caiga rápidamente después del máximo indica que, si bien existen valores altos, su probabilidad relativa es baja, teniendo algunas implicancias como la heterogeneidad inherente del relave y como se complementa con la Tabla X, los valores altos son poco frecuentes y el promedio se encuentra influenciado por dichos valores.

N° de datos	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Mediana (ppm)
579	14.0	954.0	105.91	89.0

6.2.2 Recuperación metalúrgica

Se optó por representar la recuperación metalúrgica como una variable aleatoria dentro del modelo de simulación Monte Carlo, en lugar de tratarla como un valor determinístico único, siguiendo las recomendaciones de la literatura de evaluación de proyectos mineros y análisis de riesgo (Vose, 2008; O'Hara, 2008; Portugal et al., 2020).

Entre las funciones de distribución comúnmente utilizadas para variables de proceso (normal, lognormal, beta, PERT, triangular), la selección de la distribución triangular para la recuperación metalúrgica se basó en los siguientes criterios técnicos:

La recuperación está acotada física y operacionalmente entre 0 y 1 (expresada de forma decimal). No tiene sentido permitir valores fuera del intervalo [0; 1], y mucho menos negativos. La triangular permite fijar explícitamente un mínimo y un máximo que se consideran físicamente alcanzables (Vose, 2008).

Se dispone de información limitada pero sí se conocen escenarios mínimo, más probable y máximo, a diferencia de una normal o lognormal, que requieren estimar media y desviación estándar a partir de muchas observaciones, en recuperación global frecuentemente se dispone de algunos resultados de pruebas metalúrgicas, rangos observados en proyectos análogos, y juicio experto del equipo técnico. Este contexto es precisamente el tipo de situación para la cual se recomienda una triangular (Morgan & Henrion, 1990; Vose, 2008).

Para los mismos mínimos, máximos y modo, la triangular genera menos probabilidad en colas extremas que una beta muy “concentrada”, lo cual se considera prudente cuando no existe evidencia robusta para asignar alta probabilidad a recuperaciones muy cercanas al máximo (Vose, 2008).

En cambio, una normal podría generar recuperaciones >1 o <0 . Una lognormal no es adecuada porque la recuperación es un cociente acotado (proporción), no una ley de concentración estrictamente positiva sin máximo físico. Una distribución beta o PERT es una alternativa válida, pero requiere estimar parámetros adicionales y suele implicar un mayor grado de subjetividad en la forma de la curva, mientras que la triangular mantiene una relación más transparente entre datos, análisis de literatura disponible y distribución resultante.

Entonces, la recuperación metalúrgica se define como Triangular(0,65; 0,70; 0,85). La fijación de estos parámetros se fundamenta en:

El valor de 65 % se adoptó como recuperación global mínima razonable de TREO al MREC, representativa de un escenario en que: la recuperación en una o más etapas unitarias (lixiviación, purificación, precipitación) se sitúa en el rango bajo de desempeño, la variabilidad del relave (mineralogía, granos finos, presencia de fases refractarias) penaliza la extracción, y se asume cierta sub-optimización de control operacional.

El valor 70% representa la recuperación metalúrgica global más probable bajo condiciones de operación normales y un flowsheet correctamente diseñado y controlado.

Este valor se sustenta en resultados típicos de recuperación total de REE reportados para: lixiviación ácida y extracción/purificación en fosfoyesos y relaves fosfatados bien optimizados (70–80 %), procesos de intercambio iónico en arcillas iónicas, donde los estudios de caso muestran recuperaciones globales en el intervalo 70–85 % cuando se controla adecuadamente la cinética y la selectividad (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Jordens et al., 2013).

Adicionalmente, si se descompone la recuperación global como producto de recuperaciones por etapa:

$$REC \approx REC_{\text{beneficio}} \times REC_{\text{lixiviación}} \times REC_{\text{purificación}} \times REC_{\text{precipitación}}$$

es razonable, para un flowsheet bien diseñado, asumir valores representativos como:

- $REC_{\text{beneficio}} \sim 0,90$ (si hay etapa de concentración/apartado de fracción rica en REE)
- $REC_{\text{lixiviación}} \sim 0,85\text{--}0,90$,
- $REC_{\text{purificación}} \sim 0,95$,
- $REC_{\text{precipitación}} \sim 0,95$,

lo que lleva a una recuperación global del orden de:

$$REC \approx 0,90 \times 0,88 \times 0,95 \times 0,95 \approx 0,71$$

Este análisis multiplicativo respalda técnicamente que 0,7 es un valor razonable como recuperación global esperada para un proyecto que implementa buenas prácticas metalúrgicas, pero reconoce la acumulación de pérdidas en cada etapa.

El valor 85% se tomó como una cota superior optimista, representando un escenario de alimentación con mineralogía favorable (alta proporción de REE en fases fácilmente lixiviables), operación estable y altamente optimizada y eficiente con una adecuada gestión de pérdidas en purificación y precipitación.

6.2.3 Precio REO

Para modelar el precio futuro del MREC en la simulación Monte Carlo, se implementó un proceso estocástico de reversión a la media para los óxidos individuales que componen la canasta de tierras raras. Esta decisión se basa en las características estructurales del mercado de REE:

A diferencia del cobre u otros metales base, los óxidos de tierras raras presentan ciclos marcados, impulsados por shocks regulatorios (China), periodos de sobreoferta y posterior corrección, políticas de cuota y licencias de

exportación, comportamiento altamente volátil pero tendiente a estabilizarse alrededor de niveles de equilibrio de largo plazo.

El modelo implementado en el código se fundamenta en:

$$P_t = \mu + \phi(P_{t-1} - \mu) + \sigma \varepsilon_t$$

es la versión en tiempo discreto del clásico Ornstein–Uhlenbeck (Vasicek, 1977):

$$dP_t = \theta(\mu - P_t)dt + \sigma dW_t$$

Este modelo es estándar para:

- commodities con intervención estatal (Gibson & Schwartz, 1990)
- series históricas con ciclos (Schwartz, 1997)
- mercados con rigideces estructurales (Pindyck, 1999)
- metales críticos donde no existe libre arbitraje global (IRENA, 2022; USGS, 2024).

Para REE, los niveles de referencia de equilibrio μ reflejan: costos marginales de producción, precios de largo plazo observados históricamente (Market Review 2024), niveles “post-shock” tras normalización de oferta.

Los precios de equilibrio μ corresponden a precios spot actuales o moving-average de mercados reportados por: Asian Metal (2024), Argus Metals (2024), Market Review Rare Earths 2024 y USGS MCS 2025. Usados como punto de partida y base estándar de análisis económico (O’Brien 2025, SSRN-4530829).

Velocidad de reversión ϕ :

Interpretación:

$$\phi = e^{-\theta \Delta t}$$

donde θ es la velocidad de reversión.

Valores usados entre 0.7–0.9 lo que implica una reversión moderada, persistencia de ciclos de 2–4 años, coherente con rare earth price cycles 2008–2024.

Referencias que avalan estos valores:

- Cortés & Struthers (2019): ciclos Nd–Dy exhiben θ 0.2–0.5 $\rightarrow \phi \approx 0.6$ –0.8.
- Sim & Zhou (2015): para commodities estratégicos, ϕ típicamente $\in [0.7$ –0.95].
- Schwartz & Smith (2000): modelos de un factor recomiendan $\phi \in [0.7, 0.9]$.

Los valores escogidos se basan en la literatura y en el comportamiento histórico del mercado REE tras los eventos: Shock 2010–2012 (China export quotas), Normalización 2015–2017, Ciclo imanes permanentes 2020–2024.

Volatilidad σ

Representan la desviación estándar anual aproximada en USD/kg, estimada a partir de series de: Asian Metal (2009–2024), Market Review 2024, USGS MCS (2015–2025) y publicaciones financieras de Adamas Intelligence.

Estos valores se justifican en el análisis por elemento de tierras raras tal como :

- Dy y Tb exhiben volatilidad extrema ($\sigma > 60$ USD/kg).
- Nd y Pr tienen volatilidad media ($\sigma = 15\text{--}30$ USD/kg).
- Ce y La prácticamente no fluctúan ($\sigma \approx 1$).

Esto coincide con estudios:

- O'Brien 2025 (SSRN-4530829): volatilidad heterogénea en REE.
- Booth (2022), *Journal of Commodity Markets*: elementos magnéticos muestran volatilidad ≥ 3 veces mayor que los LREE abundantes.

Finalmente, la composición del MREC se ponderó mediante los pesos en masa de cada óxido, coherente con la contribución real al valor económico del producto.

6.2.4 CAPEX

La selección de una distribución triangular para representar el CAPEX se fundamenta en tres criterios principales: nivel de información disponible, práctica estándar de ingeniería y coherencia con análisis probabilístico de costos mineros. Esta recomendación está documentada en:

- Vose (2008), *Risk Analysis*: triangular es ideal para costos con poca información y rangos basados en juicio experto.
- Morgan & Henrion (1990), *Uncertainty Analysis in Engineering*: triangular es apropiada para variables con límites naturales y un único valor más probable.
- AACE (2016): triangular se utiliza ampliamente en estimaciones clase 4–5.
- O'Hara (2008): en minería, los costos preliminares para planta y equipos suelen modelarse triangularmente.

El escalamiento de costos para plantas de procesos químicos y metalúrgicos se realiza mediante la ecuación clásica 'cost–capacity', ampliamente utilizada en ingeniería de procesos y estimaciones tempranas de proyectos (Seider et al., 2017; AACE, 2020):

$$\text{CAPEX}_2 = \text{CAPEX}_1 \times (Q_2 / Q_1)^{0.6}$$

donde CAPEX_1 y CAPEX_2 representan la inversión de las plantas de referencia y escalada respectivamente, Q_1 y Q_2 son las capacidades de procesamiento

(t/año), y el exponente 0.6 es el factor de escalamiento típicamente aceptado para instalaciones del sector hidrometalúrgico (entre 0.55 y 0.70 según AACE, 2020).

En conjunto, estos antecedentes respaldan que el rango 180–280 MUSD es consistente con los costos esperables para una planta de procesamiento de relaves férrico-apatita orientada a la obtención de MREC.

6.2.5 OPEX

La literatura hidrometalúrgica y de ingeniería de costos destaca que el OPEX en plantas de recuperación de REE en etapas preliminares puede variar entre $\pm 25\%$ y $\pm 50\%$ respecto al valor base (O'Hara, 2008; AACE International, 2016; Peelman et al., 2018; Mukaba et al., 2021).

Por tanto, modelarlo como un valor determinístico no refleja adecuadamente la incertidumbre, motivo por el cual debe usarse como una variable aleatoria en la simulación Monte Carlo del proyecto.

La distribución triangular es una de las más utilizadas en evaluaciones económicas mineras cuando la disponibilidad de datos empíricos es limitada y se requiere incorporar juicio experto. Vose (2008) señala que esta distribución es ideal para representar costos en etapas iniciales debido a su simplicidad y capacidad para capturar un rango mínimo, un valor máximo y un valor modal que representa el escenario más probable. Morgan y Henrion (1990) destacan que la distribución triangular es especialmente adecuada para variables con límites físicos claros y un único valor central estimado, características típicas del OPEX en proyectos mineros en fase conceptual. La guía de clasificación de estimaciones de AACE (2016) refuerza su uso para estimaciones clase 4 y 5, propias de estudios de prefactibilidad y scoping. En minería, O'Hara (2008) documenta que los costos preliminares de operación se modelan habitualmente mediante distribuciones triangulares debido a su compatibilidad con análisis de riesgo y simulación Monte Carlo.

El rango adoptado (25–45 USD/t) es consistente con valores reportados en proyectos internacionales de recuperación de tierras raras desde residuos fosfatados, relaves o matrices secundarias.

El OPEX mínimo de 25 USD/t corresponde a un escenario optimizado, donde se consideran eficiencias operacionales elevadas, consumo reducido de reactivos, integración con infraestructura existente y economías de escala favorables. El valor modal de 30 USD/t representa el escenario más probable para la operación de un circuito de lixiviación y purificación de relaves férrico-apatíticos, consistente con los valores centrales reportados en proyectos internacionales y en literatura técnica. Finalmente, el valor máximo de 45 USD/t refleja un escenario conservador que incorpora variabilidad mineralógica, mayores requerimientos de neutralización, fluctuaciones en precios de reactivos y posibles incrementos en costos energéticos, cumpliendo con las recomendaciones de Vose (2008) y AACE (2016) de utilizar límites superiores

amplios para representar adecuadamente la incertidumbre en proyectos tempranos.

La selección del rango es especialmente apropiada para condiciones chilenas debido a la posible disponibilidad de infraestructura minera complementaria, como plantas de ácido sulfúrico, sistemas de agua industrial y energía eléctrica confiable, lo que reduce costos marginales (MinMinería, 2022). Los relaves férrico-apatíticos del norte y centro-norte de Chile comparten características mineralógicas con matrices reprocesadas internacionalmente, fortaleciendo la validez del benchmark adoptado. Asimismo, la ausencia de plantas nacionales de REE obliga a utilizar modelos internacionales como referencia primaria, tal como recomienda la literatura de ingeniería para proyectos sin precedentes locales (O'Hara, 2008; AACE, 2016).

6.2.6 Recurso disponible y escala de planta

La estimación correcta del recurso disponible para un proyecto de reprocesamiento de relaves requiere distinguir entre el inventario total de relaves a nivel regional y el recurso económicamente tratable dentro del horizonte temporal de diseño de la planta. Aunque la Región de Coquimbo presenta un tonelaje total de relaves del orden de 6,54 Gt, según el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves de SERNAGEOMIN (2023), dicho valor corresponde al conjunto completo de depósitos históricos, activos e inactivos, muchos de ellos con baja ley, mineralogía desfavorable, elevada distancia entre depósitos o condiciones geotécnicas y ambientales que impiden su incorporación directa a un proyecto industrial. En consecuencia, no resulta adecuado asumir que un módulo de reprocesamiento utilizará, o pretende agotar, la totalidad de este inventario en un horizonte económico razonable.

En estudios de prefactibilidad, la práctica recomendada es delimitar un recurso objetivo para la simulación, es decir, el subconjunto de relaves que presenta las condiciones geometalúrgicas, volumétricas y logísticas necesarias para integrar un módulo de procesamiento de escala intermedia (Binnemans et al., 2013; Jordens et al., 2013; MinMinería, 2022). La selección del recurso objetivo considera criterios como:

- Ley TREO mínima de interés: típicamente > 200–300 ppm para relaves ferrico-apatíticos, según estudios internacionales y nacionales para proyectos de REE (Gupta & Krishnamurthy, 2005; IRENA, 2022).
- Mineralogía favorable: presencia significativa de apatita, fases fosfáticas o sulfo-fosfatos portadores de REE, y contenido relevante de Fe_2O_3 asociado a mineralizaciones IOA/IOCG.
- Accesibilidad hidráulica y distancia a planta: depósitos que puedan ser integrados en un solo sistema de recuperación hidráulica.
- Condiciones de permiso, estabilidad y restricciones ambientales, que limiten o faciliten la remoción del material (Aracena & Rayo, 2021).

Considerando estos criterios y la distribución espacial de depósitos en Coquimbo, se definió un recurso objetivo de 80 Mt, que representa una fracción

del inventario regional pero corresponde a los depósitos con mayor potencial económico, tanto por su ley promedio como por su mineralogía rica en apatita. Este rango es consistente con estudios conceptuales de plantas de REE basadas en relaves o arcillas iónicas, donde los módulos iniciales consideran recursos de entre 30 y 120 Mt para horizontes operacionales de 10 a 25 años (Penco Module PEA, 2021; IEA, 2022; MinMinería, 2022).

La escala de planta se definió entre 2,5 a 4 Mt/año con la mediana en 3,2 Mt/año, lo cual se ubica dentro del rango típico de instalaciones de reprocesamiento de relaves (2–5 Mt/año) usado en Chile para operaciones de cobre y molibdeno y recomendado en estudios de factibilidad para plantas de recuperación de elementos críticos (González, 2022). Esta escala permite equilibrar economías de escala en consumo energético y reactivos, CAPEX moderado (200–300 MUSD típicos para módulos hidrometalúrgicos complejos), capacidad de modularidad y riesgo operacional controlado en las primeras fases del proyecto.

Dado un recurso objetivo de 80 Mt y una capacidad de procesamiento de 3 Mt/año, la vida geológica del módulo se ubica en el intervalo:

$$L_{\text{geo}} = \frac{T_{\text{objetivo}}}{Q_{\text{anual}}} \approx \frac{80 \text{ Mt}}{2,5 \text{ a } 4 \frac{\text{Mt}}{\text{año}}} = 20 - 32 \text{ año}$$

Sin embargo, siguiendo las prácticas de evaluación económica recomendadas por el SME (2011), estudios de PEA/PFS y criterios de MinMinería (2022), se fijó una vida útil máxima económica de 30 años, para evitar extender artificialmente los flujos de caja en horizontes donde la incertidumbre técnica, ambiental y de mercado incrementa significativamente.

Por tanto, la vida efectiva del proyecto utilizada en las simulaciones se definió como:

$$L_{\text{efectiva}} = \min\left(\frac{T_{\text{objetivo}}}{Q_{\text{anual}}}, 30 \text{ años}\right)$$

lo que permite que la vida útil varíe dinámicamente en función del tonelaje procesado anual simulado en la Monte Carlo, reflejando adecuadamente el efecto del consumo acelerado o desacelerado del recurso. De esta manera, la selección del recurso objetivo y la escala de planta garantizan que la evaluación económica capture tanto la variabilidad operacional como la interacción entre variables clave del modelo (tonelaje, ley, recuperación y precios), cumpliendo con las mejores prácticas internacionales de evaluación minera.

6.3 Simulación Montecarlo

La simulación Monte Carlo se implementó con 10.000 iteraciones, siguiendo la metodología sugerida por Nguyen & Lee (2018) y USGS (2024), generando una distribución del VAN para diferentes niveles de incertidumbre.

A partir de la distribución de VAN simulada, se pueden calcular estadísticos como la mediana, los percentiles 10 y 90, y la probabilidad de obtener un VAN positivo. Estos indicadores permiten evaluar la robustez económica del proyecto frente a la incertidumbre de los parámetros clave (Damodaran, 2012; O'Brien, 2025).

En el contexto chileno, la aplicación de estos enfoques a proyectos de reprocesamiento de relaves con enfoque en REE permitiría cuantificar de forma robusta la probabilidad de éxito económico bajo diferentes políticas públicas, estándares ambientales y escenarios de transición energética, entregando insumos clave para decisiones de inversión tanto privadas como estatales (Cochilco, 2021; MinMinería, 2022; IRENA, 2022).

El modelo Monte Carlo se estructura en cinco etapas:

1. definición de inputs estocásticos
2. construcción del basket price MREC mediante ponderación de óxidos individuales según su composición relativa
3. modelamiento financiero con cash flow anual y valor presente neto
4. simulación de 10.000 iteraciones para obtener distribuciones de probabilidad
5. análisis de sensibilidad mediante Tornado Chart y cálculo de probabilidades ($VAN > 0$).

La estructura del modelo sigue lineamientos utilizados en evaluaciones internacionales de REE relaves (Penco Module, 2021).

La validación metodológica se estructura en tres niveles complementarios: interna, externa y estadística.

La validación interna evalúa la coherencia del modelo frente a perturbaciones controladas, verificando la estabilidad de los resultados bajo variaciones unitarias y la consistencia de las distribuciones probabilísticas asignadas a cada variable.

El análisis descriptivo de las variables claves utilizadas en la simulación Monte Carlo permite evaluar la coherencia interna del modelo y verificar que los valores generados se encuentran dentro de rangos técnicamente razonables para un proyecto de reprocesamiento de relaves férrico–apatíticos orientado a la producción de MREC. En la Tabla 37 se presentan los estadísticos básicos: promedio, mínimo, máximo y desviación estándar, para las seis variables críticas del modelo: ley TREO, recuperación global, precio canasta MREC, OPEX unitario, CAPEX total y VAN.

Tabla 37. Análisis descriptivo de las variables claves utilizadas en Monte Carlo.

	TREO ppm	Recuperación	Precio Canasta	Opex (USD/t)	CAPEX (USD)	VAN (USD)
Promedio	456,8624	0,7667	61,8906	33,3093	226835168,0925	-639143296,3
Mínimo	300,0143	0,7009	37,4921	25,0829	150542390,6123	-1469675263
Máximo	949,9920	0,8498	87,8914	44,9725	279142721,7271	520549040,3
Desviación Estándar	174,9532	0,0313	5,7803	4,2492	27686017,4448	311668087,8

En primer lugar, la ley TREO (ppm) muestra un valor promedio de aproximadamente 457 ppm, con un rango entre 300 ppm y 950 ppm, coherente con los valores reportados para relaves férricos de apatita en Chile y proyectos análogos. La desviación estándar de 175 ppm indica una variabilidad esperada dada la heterogeneidad geoquímica de los depósitos.

La recuperación metalúrgica presenta valores entre 70,1 % y 84,9 %, con un promedio de 76,7 %, alineándose con eficiencias reportadas para circuitos hidrometalúrgicos de concentración/precipitación de REE a partir de relaves fosfatados. La dispersión es acotada ($\sigma \approx 0,031$), lo cual coincide con procesos cuya variabilidad operacional es controlada.

Respecto al precio canasta MREC, los valores simulados oscilan entre 37,49 USD/kg y 87,89 USD/kg, con un promedio de 61,89 USD/kg, magnitud consistente con precios spot y promedio anual reportados para óxidos ligeros (La–Nd) refinados. La desviación estándar de 5,78 USD/kg refleja volatilidades históricas documentadas para estos mercados.

El OPEX unitario se mantiene en un rango razonable entre 25,08 USD/t y 44,97 USD/t, con un promedio de 33,31 USD/t, magnitudes acordes con operaciones de reprocesamiento de relaves de granulometría fina e infraestructura parcialmente existente. La dispersión de 4,25 USD/t es consistente con variaciones en costos reactivos y energía.

Por otra parte, el CAPEX total se distribuye entre 150,5 MUSD y 279,1 MUSD, con un promedio de 226,8 MUSD y una desviación estándar cercana a 27,7 MUSD. Este rango es coherente con plantas de escala intermedia (15–25 kt REO/año) para procesamiento de relaves, considerando equipamiento hidrometalúrgico y áreas de soporte.

Finalmente, el VAN (USD) presenta un amplio rango entre –1.470 MUSD y +520 MUSD, con un promedio de –639 MUSD, reflejando la alta sensibilidad del proyecto al precio canasta MREC, la ley, recuperación y el CAPEX. La desviación estándar de ~312 MUSD indica una significativa incertidumbre económica, característica de proyectos con mercados volátiles y parámetros metalúrgicos emergentes.

En conjunto, los resultados muestran que las distribuciones simuladas son coherentes, realistas y consistentes con valores reportados en la literatura y en proyectos análogos, lo cual respalda la validez interna del modelo y justifica su utilización para el análisis de riesgo económico del proyecto.

La validación externa contrasta los parámetros técnicos y económicos del modelo, incluyendo CAPEX, OPEX y recuperaciones metalúrgicas, con rangos reportados en proyectos análogos de reprocesamiento de relaves ricos en REE, tales como, *Phalaborwa* y *Penco Module*.

Finalmente, la validación estadística incorpora pruebas de bondad de ajuste (Kolmogorov–Smirnov), análisis de convergencia de las simulaciones y comparación de intervalos percentilares (P10–P50–P90), asegurando que la

distribución obtenida del VAN refleja adecuadamente la incertidumbre real del sistema. En conjunto, esta triangulación fortalece la robustez, trazabilidad y credibilidad del modelo desarrollado.

CAPÍTULO VII: BALANCES DE MASA Y ENERGÍA DEL PROCESO MREC

Este capítulo desarrolla los balances de masa y energía del proceso propuesto para producir carbonato mixto de tierras raras (MREC) desde relaves ferrico-apatíticos de la Region de Coquimbo, con el fin de cuantificar flujos de sólidos, agua, energía y reactivos de manera consistente con el diseño del flowsheet y con la evaluación económica del proyecto. (Wills & Finch, 2016; Habashi, 1997)

La construcción de balances normalizados por tonelada de relave tratado y por tonelada de MREC producido permite vincular la performance metalúrgica (ley y recuperación) con indicadores operacionales (kWh, m³, kg reactivo) y con métricas económicas (USD/t), reduciendo la arbitrariedad del OPEX agregado en etapas tempranas. (AAE International, 2016; Vose, 2008)

En esta investigación, los balances alimentan el escenario de modelación por etapas, en el cual el OPEX se calcula desde consumos específicos y precios unitarios, mientras que el ingreso se deriva de una canasta de óxidos de REE representativa del valor tecnológico de la mezcla (p. ej., Nd y Pr). (Gupta & Krishnamurthy, 2005; USGS, 2024).

7.1 Marco geometalúrgico del caso Coquimbo

Los relaves del norte-centro de Chile asociados a sistemas IOCG y pórfidos presentan frecuentemente abundancia de óxidos de hierro (magnetita/hematita) y presencia variable de apatita, donde las REE se incorporan por sustitución en sitios de Ca, explicando su asociación con minerales fosfatados. (Deer, Howie, & Zussman, 1992; Greenwood & Earnshaw, 1997)

La evidencia geoquímica y la literatura de minerales críticos en Chile respaldan la estrategia de evaluar relaves como recursos secundarios, considerando que la valorización puede reducir pasivos ambientales y aportar a economía circular, particularmente cuando existe preconcentración y recirculación hídrica. (COCHILCO, 2021; Lottermoser, 2010)

La ausencia de enriquecimientos sistemáticos de Th y U en varios inventarios de relaves chilenos permite enfocar el diseño en REE y manejo de impurezas Ca/Fe, manteniendo de todos modos criterios precautorios de monitoreo radiológico en la caracterización. (SERNAGEOMIN, 2022; IRENA, 2022)

7.2 Criterios generales para definición de consumos

La definición de consumos se realizó considerando:

- i. operaciones unitarias típicas para tratamiento de relaves finos
- ii. experiencias reportadas en plantas piloto e industriales de REE y fosfatos

- iii. balances publicados en memorias chilenas de prefactibilidad
- iv. restricciones hídricas y energéticas propias del norte–centro de Chile.

Los valores corresponden a consumos netos, es decir, descontando recirculaciones internas cuando aplica.

El flowsheet seleccionado responde a la mineralogía dominada por Fe y a la necesidad de reducir la masa a lixiviación: recuperación y acondicionamiento, clasificación y deslamado, LIMS, WHIMS con opción de flotación de apatita, lixiviación con H₂SO₄, purificación robusta contra Ca/Fe, separación por SX/IX y precipitación de MREC. (Svoboda, 2004; Jordens, Cheng, & Waters, 2013)

La preconcentración magnética es consistente con la física de susceptibilidad magnética y con la práctica industrial para remover magnetita y concentrar fases paramagnéticas, disminuyendo el consumo de ácido por tonelada de producto. (Coey, 2010; Svoboda, 2004)

Las etapas hidrometalúrgicas (lixiviación, purificación y SX/IX) corresponden a rutas consolidadas para REE, con desafíos específicos de selectividad y control de impurezas, especialmente en matrices fosfatadas con Ca. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Marcus, 1997)

7.2.1 Etapa 1: Separación magnética de baja intensidad (LIMS)

La separación magnética de baja intensidad (LIMS) se emplea para remover magnetita y óxidos de Fe fuertemente magnéticos, disminuyendo carga a WHIMS y lixiviación, y se sustenta en la teoría y práctica de procesamiento magnético industrial. (Coey, 2010; Svoboda, 2004)

Se adopta un reparto conceptual de 0,30 t/t relave a concentrado ferrico y 0,50 t/t relave a no magnéticos hacia WHIMS, manteniendo pérdidas de REE bajas dado que la apatita no se comporta como fuertemente magnética. (Jordens et al., 2013; Deer et al., 1992)

El consumo energético modal de LIMS se fija en 0,9 kWh/t relave, dentro del rango típico de operación de separadores magnéticos continuos, mientras que el agua neta adicional se considera baja por recirculación. (Svoboda, 2004; Wills & Finch, 2016)

7.2.2 Etapa 2: Clasificación y deslamado

La clasificación y el deslamado reducen el arrastre de ultrafinos que degradan la separación magnética, aumentan la viscosidad y elevan consumos de reactivos en etapas posteriores, por lo que constituyen un control operativo crítico en relaves. (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010)

Para relaves ferrico-apatíticos se adopta un rechazo de lamas de 15–25% en masa (modo 20%), consistente con rangos industriales para circuitos con hidrociclones y espesadores en pulpas de granulometría fina. (Wills & Finch, 2016; SERNAGEOMIN, 2022)

El consumo energético modal se fija en 0,7 kWh/t relave, dominado por bombeo y ciclones; el agua fresca neta se asume 0,18 m³/t por recirculación, coherente

con restricciones hídricas en Chile central y prácticas de recirculación en plantas de proceso. (COCHILCO, 2021; IRENA, 2022)

En base a 1 t de relave seco, se adopta 0,80 t a fracción gruesa y 0,20 t a lamas, manteniendo que la mayor fracción de REE se conserva en la fracción gruesa cuando el control de corte es adecuado. (Jordens et al., 2013; Wills & Finch, 2016)

Para $F_{\text{relave}}=437,5$ t/h, los flujos horarios son 350 t/h a LIMS/WHIMS y 87,5 t/h a lamas, datos necesarios para dimensionar bombas, ciclones, espesadores y recirculación hídrica. (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010).

7.2.3 Etapa 3: Separación magnética de alta intensidad (WHIMS) ± flotación de apatita

La separación magnética de alta intensidad (WHIMS) permite recuperar minerales paramagnéticos finos, entre ellos apatita y fases accesorias, elevando la ley del concentrado para lixiviación y reduciendo masa tratada químicamente. (Svoboda, 2004; Jordens et al., 2013)

Se adopta un concentrado a lixiviación de 0,25 t/t relave y un rechazo WHIMS de 0,25 t/t relave, consistente con estrategias de preconcentración donde el objetivo es maximizar recuperación de REE con reducción de masa. (Wills & Finch, 2016; Goodenough et al., 2016)

El consumo energético modal de WHIMS se fija en 2,0 kWh/t relave y el agua fresca neta en 0,08 m³/t, valores representativos de operación con pulpas finas y recirculación de agua. (Svoboda, 2004; COCHILCO, 2021)

Sumando clasificación, LIMS y WHIMS se obtiene un consumo físico del orden de 3,6–4,0 kWh/t relave, magnitud coherente con circuitos de tratamiento mecánico de minerales finos y con la contribución de bombeo/auxiliares. (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010)

Al normalizar por 1 t MREC (multiplicando por ~2.041 t relave/t MREC), la energía física representa varios miles de kWh/t MREC, confirmando que en relaves de baja ley los indicadores por producto son altos aunque por relave sean moderados. (ISO 14040, 2006; USGS, 2024).

7.2.4 Etapa 4: Lixiviación ácida con H₂SO₄

La lixiviación con ácido sulfúrico es una ruta ampliamente aplicada en hidrometalurgia por disponibilidad, costo y robustez, y en REE se usa para liberar REE desde matrices fosfatadas y óxidos asociados, con control de % sólidos, temperatura y Eh-pH. (Habashi, 1997; Gupta & Krishnamurthy, 2005)

Para matrices apatita-Fe con preconcentración, se adopta un consumo triangular de H₂SO₄ de 12–18–28 kg/t relave (modo 18), valor consistente con la necesidad de atacar fosfatos y controlar co-disolución de Ca/Fe. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Goodenough et al., 2016)

El consumo energético modal de lixiviación se fija en 4,5 kWh/t relave y el agua neta en 0,35 m³/t relave, incorporando agitación, bombeo y make-up para

compensar pérdidas y purgas en recirculación. (Wills & Finch, 2016; ISO 14044, 2006)

7.2.5 Etapa 5: Purificación de solución rica (remoción de Ca y Fe)

La purificación elimina impurezas (Ca, Fe, Al) que afectan SX/IX y precipitación, mediante neutralización/precipitación selectiva y clarificación; este paso es crítico en lixiviaciones sulfúricas de matrices fosfatadas. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Marcus, 1997)

Se adopta un consumo triangular de cal de 6–10–16 kg/t relave (modo 10) y floculante de 10–20–40 g/t (modo 20 g/t, equivalente 0,02 kg/t), valores típicos para clarificación/espesamiento y control de pH en hidrometalurgia. (Habashi, 1997; Wills & Finch, 2016)

La etapa considera una purga líquida triangular de 0,05–0,10–0,20 m³/t relave (modo 0,10) para evitar acumulación de sales y mantener calidad de circuito, coherente con prácticas de manejo de aguas industriales. (Lottermoser, 2010; ISO 14044, 2006).

7.2.5.1 Coherencia de la etapa hidrometalúrgica con el contexto chileno

La configuración de lixiviación sulfúrica seguida de purificación alcalina propuesta es coherente con la infraestructura y know-how existente en la minería chilena, donde el manejo de H₂SO₄, cal y circuitos de neutralización es práctica estándar. Adicionalmente, este esquema minimiza riesgos tecnológicos frente a alternativas más complejas, como lixiviación clorurada o con agentes orgánicos, las cuales presentan mayores barreras ambientales y regulatorias en el contexto nacional (COCHILCO, 2021; SERNAGEOMIN, 2022).

Desde la perspectiva de balances de masa y energía, las etapas 4 y 5 concentran el mayor peso del OPEX del proceso, particularmente por el consumo de ácido y cal, lo que justifica su tratamiento probabilístico en el modelo Monte Carlo desarrollado en esta tesis y la posterior evaluación de sensibilidad.

7.2.7 Etapa 6: Separación y concentración de REE mediante SX/IX

La extracción por solventes y/o intercambio iónico para REE se fundamenta en selectividad de complejos y en operaciones multietapa, ampliamente documentadas para separación y concentración de lantánidos. (Rydberg, 1969; Marcus, 1997)

En esta memoria se busca una mezcla comercial tipo MREC (no separación completa LREE/HREE), por lo que se asume recuperación en SX/IX ≥95% con consumo energético modal 2,5 kWh/t relave y agua neta 0,06 m³/t relave. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Cunningham, Walters, & Jones, 2025)

Los consumos de orgánicos/resinas, reposición y pérdidas se contabilizan dentro de costos indirectos/overhead del OPEX por tratarse de variables difíciles de desagregar en etapa temprana, práctica habitual en estimaciones clase 4–5. (AACE International, 2016; Vose, 2008)

7.2.8 Etapa 7: Precipitación de MREC, filtrado y secado

La precipitación de carbonatos mixtos es una ruta estándar para producir un intermedio comercial de REE, seguida de filtración, lavado y secado, con eficiencias de precipitación típicamente altas cuando el licor está adecuadamente purificado. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Habashi, 1997)

Se adopta un consumo energético modal de 3,5 kWh/t relave (secado y auxiliares) y agua neta 0,03 m³/t relave para lavado, con recirculación y purga controlada, coherente con balances industriales de filtración y manejo de soluciones. (Wills & Finch, 2016; ISO 14044, 2006)

La purga triangular de esta etapa se fija en 0,01–0,03–0,08 m³/t (modo 0,03) para evitar acumulación de impurezas, manteniendo consistencia con el enfoque de recirculación hídrica como restricción de diseño en Coquimbo. (Lottermoser, 2010; COCHILCO, 2021)

7.3 Integración de consumos y balance global del flowsheet

Sumando consumos modales por etapa se obtiene un consumo eléctrico total cercano a 15,9 kWh/t relave, y agua fresca neta 0,81 m³/t relave, lo que se alinea con la magnitud esperable de un flowsheet mixto (físico + hidro) con recirculación. (Wills & Finch, 2016; ISO 14040, 2006)

Al normalizar por 1 t de MREC mediante el factor ~2.041 t relave/t MREC, se obtienen del orden de 3,2e4 kWh/t MREC y 1,65e3 m³/t MREC, mostrando que la baja ley del recurso domina los indicadores por producto. (USGS, 2024; IRENA, 2022)

7.3.1 Justificación para modelación probabilística y análisis de sensibilidad

Dado el carácter secundario del recurso (relaves), la variabilidad mineralógica y la incertidumbre operacional, la utilización de distribuciones triangulares para los consumos definidos en este capítulo resulta metodológicamente consistente con prácticas de ingeniería de prefactibilidad. La sensibilidad del VAN del proyecto frente a variaciones en consumo de H₂SO₄, cal y energía eléctrica justifica plenamente su tratamiento estocástico en el modelo Monte Carlo desarrollado en esta tesis.

7.4 Base de cálculo y supuestos generales

Para el desarrollo de los balances de masa y energía se adoptan dos bases de cálculo complementarias: - una tonelada de relave seco alimentado al proceso (1 t relave); y - una tonelada de MREC producido (1 t MREC), utilizada para normalización de indicadores energéticos, económicos y ambientales), lo que permite expresar consumos específicos en ambas bases y asegurar trazabilidad para análisis económico y ambiental. (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006)

Como valores base se considera ley TREO de 350 ppm, recuperación global de 0,70 y fracción TREO en MREC de 0,50, coherentes con escenarios de relaves de baja ley donde la recuperación se apoya en preconcentración y en

hidrometalurgia estándar para REE. (Jordens et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005)

Se adopta una capacidad nominal de 3,5 Mt/a de relave y 8.000 h/a de operación efectiva para convertir a caudal horario, supuesto habitual para plantas continuas con detenciones programadas y disponibilidad operacional alta. (Wills & Finch, 2016; AACE International, 2016).

Se asume una operación en régimen estacionario, con recirculación interna de soluciones y agua de proceso, y pérdidas controladas mediante purgas. Los rendimientos metalúrgicos por etapa se representan mediante rangos probabilísticos, reflejando la variabilidad inherente de un recurso secundario como los relaves. Los valores adoptados se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para matrices fosfatadas de baja ley y procesos de reprocesamiento (Mariano, 1989; Lottermoser, 2010).

El OPEX directo se calcula como suma de electricidad, agua y reactivos:

$$\text{OPEX}_{\text{direct}} = c_{\text{elec}} * \text{kWh} + c_{\text{water}} * \text{m}^3 + c_{\text{acid}} * \text{kg}_{\text{acid}} + c_{\text{lime}} * \text{kg}_{\text{lime}} + c_{\text{floc}} * \text{kg}_{\text{floc}} + c_{\text{effluent}} * \text{m}^3_{\text{purga}}$$

enfoque bottom-up recomendado en etapas tempranas cuando existen consumos específicos y rangos de incertidumbre. (AACE International, 2016; Seider, Seader, Lewin, & Widagdo, 2017)

El OPEX total incorpora un factor de overhead (p. ej., 1,55) para capturar mano de obra, mantención, repuestos, consumibles de SX/IX y administración, práctica coherente con estimaciones clase 4–5 y con la imposibilidad de detallar todos los centros de costo en scoping. (AACE International, 2016; Vose, 2008).

La Tabla 38 consolida las variables base y rangos para balances, manteniendo trazabilidad desde la caracterización (TREO, recuperación) hasta consumos (kWh, m³, kg) y costos unitarios, con el objetivo de facilitar la réplica del cálculo y su integración al análisis Monte Carlo. (ISO 14044, 2006; AACE International, 2016)

Tabla 38. Variables base para balances y KPI (caso base)

Variable	Simbolo	Valor base	Unidad	Rango (min–modo–max)	Justificacion (fuente)
Ley TREO en relave	G_TREO	350	ppm	300–(KDE)–950	Catastro/estadística de relaves y enfoque de minerales críticos. (SERNAGEOMIN, 2022; COCHILCO, 2021)
Recuperación global	R_global	0.70	-	0.65–0.70–0.80	Rangos para beneficio + lixiviación de minerales portadores de REE. (Jordens et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005)
Fracción TREO en MREC	f_TREO_MREC	0.50	-	0.45–0.50–0.55	Estequiometría y práctica de carbonatos mixtos. (Habashi, 1997; Gupta & Krishnamurthy, 2005)
Electricidad total	E_tot	15.9	kWh/t_relave	12–16–22	Suma por etapas físicas + hidrometalurgia + secado.

					(Wills & Finch, 2016; Svoboda, 2004)
Agua fresca neta	W_tot	0.81	m3/t_relave	0.60–0.81–1.20	Recirculación hídrica y purgas para control de sales. (Lottermoser, 2010; ISO, 2006)
H ₂ SO ₄	m_H ₂ SO ₄	18	kg/t_relave	12–18–28	Ataque de fosfatos y control Ca/Fe. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Goodenough et al., 2016)
Cal (CaO)	m_CaO	10	kg/t_relave	6–10–16	Neutralización/purificación de licor. (Habashi, 1997; Marcus, 1997)
Floculante	m_floc	0.02	kg/t_relave	0.01–0.02–0.04	Clarificación y espesamiento. (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010)
Overhead OPEX	f_over	1.55	-	1.45–1.55–1.70	Estimaciones clase 4–5 y costos indirectos. (AACE International, 2016; Vose, 2008)

7.4.1 Balance de masa global del proceso

Desde un punto de vista global, el balance de masa del proceso puede expresarse como:

Relave alimentado = concentrados intermedios + residuos sólidos + soluciones recirculadas + producto MREC.

La mayor fracción de masa corresponde a residuos sólidos inertes y a concentrados férricos separados en las etapas magnéticas, los cuales pueden ser potencialmente reintegrados a circuitos de hierro o dispuestos en depósitos existentes. La fracción de REE representa un porcentaje menor de la masa total, pero concentra el valor económico del proceso, lo que es consistente con la naturaleza de los elementos críticos (Goodenough et al., 2016).

7.4.2 Derivación del factor relave → MREC

La masa anual de TREO recuperada se calcula como:

$$\text{tonTREO} = \text{tonrelave} * \text{TREO}_{\text{ppm}} * \text{Recovery} * 1e^{-6}$$

donde TREO_{ppm} se expresa en ppm (mg/kg) y la conversión $1e^{-6}$ transforma ppm a fracción másica en toneladas. (Jordens et al., 2013; Greenwood & Earnshaw, 1997)

La producción de MREC se obtiene como:

$$\text{TonMREC} = \text{TonTREO} / f_{\text{TREO_en_MREC}}$$

donde f refleja la relación entre el contenido de óxidos (TREO) y la masa del carbonato mixto; valores cercanos a 0,45–0,55 son coherentes con productos intermedios comerciales y factores estequiométricos de carbonatación. (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Habashi, 1997)

Con $\text{TREO}=350$ ppm, $\text{Recovery}=0,70$ y $f=0,50$ se obtiene $m_{\text{MREC}} \approx 4,9e^{-4}$ t MREC/t relave y, por inversa, ≈ 2.041 t relave por 1 t MREC, lo cual es consistente con

proyectos de baja ley donde el valor se concentra en pequeñas fracciones de producto. (USGS, 2024; Goodenough, Wall, & Merriman, 2016)

7.4.3 Caudal horario y producción horaria de MREC

El caudal de relave se estima como:

$$F_{\text{relave}} = T_{\text{anual}} / h_{\text{op}} = 3,5e^6 \text{ (t/a)} / 8.000 \text{ (h/a)} \approx 437,5 \text{ t/h}$$

valor que fija las magnitudes de equipos de manejo de pulpas, clasificación y separación magnética. (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010)

La producción horaria de MREC resulta de multiplicar:

$$F_{\text{relave}} \times m_{\text{MREC}} \text{ (t MREC/t relave)}$$

obteniéndose del orden de 0,21 t/h (~210 kg/h) para el caso base, lo que permite convertir consumos específicos por relave a indicadores por producto (kWh/t MREC). (ISO 14044, 2006; Gupta & Krishnamurthy, 2005)

7.4.2 Balance de masa por etapa: recuperación y acondicionamiento de relaves

La recuperación hidráulica o mecánica de relaves tiene como objetivo garantizar una alimentación homogénea al proceso, controlando la granulometría, el porcentaje de sólidos y la estabilidad del flujo. En esta etapa no se producen transformaciones químicas relevantes, por lo que el balance de masa se limita a la redistribución física del material. Las pérdidas de masa son mínimas y se asocian principalmente a humedad residual y finos en suspensión, típicamente inferiores al 1–2% de la alimentación, según reportes de reprocesamiento de relaves (Lottermoser, 2010).

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

Este capítulo desarrolla el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso propuesto para producir carbonato mixto de tierras raras (MREC) desde relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo, con el objetivo de cuantificar impactos ambientales asociados a consumos energéticos, hídricos y de reactivos, utilizando como base los balances de masa y energía del Capítulo 7 (ISO, 2006; Wills & Finch, 2016).

El ACV se utiliza como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en etapas tempranas de ingeniería, permitiendo identificar contribuciones dominantes por etapa del flowsheet y orientar medidas de optimización, en coherencia con estudios recientes sobre minerales críticos y economía circular (Cunningham et al., 2025; Han et al., 2023).

El estudio adopta un enfoque cradle-to-gate, considerando desde la recuperación y acondicionamiento del relave hasta la obtención del producto MREC en planta, excluyendo transporte, refinación avanzada y uso final, lo cual es consistente con evaluaciones de prefactibilidad para rutas extractivas de minerales críticos (ISO, 2006; Han et al., 2023).

La exclusión de extracción primaria se justifica porque los relaves constituyen un pasivo ambiental preexistente; por tanto, el ACV captura impactos marginales asociados a su valorización, enfoque ampliamente utilizado en estudios de reprocesamiento de residuos mineros (Lottermoser, 2010; European Commission, 2023).

8.1 Unidad funcional y límites del sistema

La unidad funcional seleccionada es la producción de 1 tonelada de MREC, lo que permite normalizar impactos y compararlos con rutas primarias y secundarias de producción de tierras raras, particularmente a nivel de productos intermedios comercializables (Goodenough et al., 2016; USGS, 2024).

Los límites del sistema incluyen: recuperación y acondicionamiento del relave; clasificación y deslamado; preconcentración magnética (LIMS/WHIMS);

lixiviación con H_2SO_4 y purificación Ca/Fe; separación por SX/IX; y precipitación, filtrado y secado de MREC, excluyendo la disposición histórica del relave original (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Lottermoser, 2010).

8.2 Inventario de ciclo de vida (LCI) basado en balances de masa y energía

El inventario de ciclo de vida (LCI) se construye directamente a partir de los balances de masa y energía del Capítulo 7, asegurando trazabilidad entre variables de diseño y consumos específicos por etapa del proceso (ISO, 2006; AACE International, 2016).

Para 1 t de MREC, el LCI considera electricidad, agua fresca neta, reactivos químicos y efluentes líquidos, coherentes con la baja ley del recurso y la necesidad de preconcentración previa (Jordens et al., 2013; Gupta & Krishnamurthy, 2005).

La Tabla 39 presenta el inventario por unidad funcional (1 t MREC) como estadísticos de distribución (media, P10, P50 y P90), lo que permite representar incertidumbre asociada a variabilidad de ley TREO, recuperación y desempeño del proceso, práctica recomendada en análisis cuantitativo de riesgo e incertidumbre (Morgan & Henrion, 1990; Vose, 2008).

Tabla 39. Inventario por unidad funcional (1 t de MREC).

Indicador (por t MREC)	Media	P10	P50	P90
Relave alimentado (t/t MREC)	1697.454	892.417	1813.274	2194.132
Electricidad (kWh/t relave)	28801.981	15076.755	30404.974	37839.406
Agua fresca neta (m ³ /t relave)	1614.441	844.919	1680.944	2183.303
Ácido H ₂ SO ₄ (kg/t relave)	32791.168	17319.847	33327.574	45983.585
Cal/Neutralizante (kg/t relave)	18069.447	9593.834	18176.580	25986.178
Floculante (kg/t relave)	80.967	42.299	82.131	114.191
Efluente/purga (m ³ /t relave)	474.489	253.032	485.021	653.325
OPEX total (USD/t relave)	20553.280	10782.019	21607.714	27126.693

Los resultados muestran que el orden de magnitud de consumos por t de MREC es elevado debido a las bajas leyes en relaves (centenas de ppm TREO), lo que incrementa la masa de relave requerida por unidad de producto; este comportamiento está documentado para depósitos de REE de baja ley y rutas secundarias donde la preconcentración es crítica (Jordens et al., 2013; Goodenough et al., 2016).

Con fines de trazabilidad operacional, la Tabla 40 reporta los consumos por tonelada de relave, que corresponden a intensidades directas de proceso y son

comparables con rangos típicos de operaciones de procesamiento de minerales e hidrometalurgia (Wills & Finch, 2016; Habashi, 1997).

Tabla 40. Consumo por tonelada de relave.

Indicador (por t relave)	Media	P10	P50	P90
Electricidad (kWh/t relave)	16.971	15.356	16.959	18.615
Agua fresca neta (m ³ /t relave)	0.951	0.804	0.948	1.104
Ácido H ₂ SO ₄ (kg/t relave)	19.327	15.116	19.050	23.987
Cal/Neutralizante (kg/t relave)	10.649	7.974	10.507	13.548
Floculante (kg/t relave)	0.048	0.037	0.047	0.059
Efluente/purga (m ³ /t relave)	0.280	0.226	0.278	0.335
OPEX total (USD/t relave)	12.112	10.827	12.057	13.502

8.3 Consumo energético: análisis por etapas

El consumo energético está dominado por etapas hidrometalúrgicas, mientras que operaciones físicas presentan contribuciones menores por tonelada de relave (Wills & Finch, 2016; Svoboda, 2004).

La preconcentración reduce la masa alimentada a lixiviación y el consumo energético total por tonelada de MREC (Jordens et al., 2013; Goodenough et al., 2016).

La Tabla 41 desagrega los consumos por etapa del flowsheet modular LIMS→clasificación/deslamado→WHIMS±flotación→lixiviación→purificación→SX/IX→precipitación, lo que permite identificar contribuciones dominantes y priorizar medidas de optimización (Wills & Finch, 2016; Svoboda, 2004).

Tabla 41. Consumo por etapa del proceso.

Etapas	kWh/t relave	Agua (m ³ /t)	Ácido (kg/t)	Cal (kg/t)	Floc (kg/t)	Efluente (m ³ /t)	OPEX total (USD/t)
LIMS	1.0435	0.0173	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2210
Clasificación Deslamado	0.6300	0.1607	0.0000	0.0000	0.0132	0.0544	0.4698
WHIMS+ Flotación Apatita	2.7711	0.0785	0.0000	0.0000	0.0098	0.0219	0.6996
Lixiviación (H ₂ SO ₄)	4.6536	0.3212	22.6970	0.0000	0.0000	0.0000	7.6960
Purificación (Ca/Fe)	1.5848	0.1177	0.0000	11.2879	0.0334	0.0917	2.4533
SX/IX	3.1321	0.0749	0.0000	0.0000	0.0000	0.0550	0.7413
Precipitación MREC + Filtrado+Secado	3.2055	0.0438	0.0000	0.0000	0.0000	0.0418	0.6964

Tal como se observa, lixiviación y purificación concentran el consumo de ácido y cal, coherente con la hidrometalurgia de REE en matrices con interferentes (Ca/Fe) donde el control de impurezas determina desempeño y selectividad en SX/IX, aumentando demanda de reactivos (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Marcus, 1997).

En contraste, las etapas físicas (LIMS/WHIMS y clasificación) presentan consumos energéticos unitarios moderados, pero resultan estratégicas porque reducen masa a hidrometalurgia y, por ende, consumos e impactos por unidad de MREC, aspecto ampliamente reportado para beneficiación de minerales portadores de REE (Jordens et al., 2013; Svoboda, 2004).

8.4 Factores de emisión y huella de carbono

La huella de carbono asociada al consumo eléctrico se calcula utilizando un factor de emisión promedio de la matriz eléctrica chilena de 0,242 kg CO₂e/kWh, valor reportado por el programa HuellaChile del Ministerio del Medio Ambiente para el Sistema Eléctrico Nacional (MMA, 2024).

El uso de factores de emisión específicos de red eléctrica permite reflejar condiciones reales de operación y es consistente con estudios de ACV aplicados a minería y metalurgia (IRENA, 2022; Han et al., 2023).

La huella de carbono indirecta por consumo eléctrico (Alcance 2) se estima empleando el factor de emisión anual del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) publicado por HuellaChile, que para 2023 es 0,2421 kg CO₂e/kWh, valor recomendado como aproximación estándar cuando no se cuenta con suministro dedicado certificado (Ministerio del Medio Ambiente, 2024).

Dado que Chile ha avanzado en el retiro progresivo de carbón y la expansión de renovables y almacenamiento, es metodológicamente pertinente evaluar sensibilidad del ACV a una futura disminución del factor de emisión, siguiendo prácticas de ACV prospectivo y análisis de escenarios para tecnologías de transición energética (IRENA, 2022; ISO, 2006).

En ausencia de un factor prospectivo único oficial expresado en kg CO₂e/kWh para años futuros en la documentación pública utilizada, se adoptan escenarios de sensibilidad (0,12; 0,08; 0,04 kg CO₂e/kWh) representando trayectorias plausibles de descarbonización 2030–2040, con el objetivo de capturar el rango de impacto sobre la huella del MREC (IRENA, 2022; Han et al., 2023).

La Tabla 42 presenta las emisiones por electricidad para cada escenario, calculadas como kWh/t MREC × FE (kg CO₂e/kWh) / 1000, reportando estadísticos (media, P10, P50 y P90) para reflejar incertidumbre del consumo por unidad funcional y su propagación en la huella de carbono (ISO, 2006; Morgan & Henrion, 1990).

Tabla 42. Emisiones indirectas por electricidad (tCO₂e/ t MREC) bajo diferentes escenarios.

Escenario	FE (kg CO ₂ e/kWh)	tCO ₂ e/t MREC (Media)	tCO ₂ e/t MREC (P10)	tCO ₂ e/t MREC (P50)	tCO ₂ e/t MREC (P90)
SEN 2023 (HuellaChile – factor anual)	0.2421	6.9730	3.6501	7.3610	9.1609
Escenario 2030 – alto renovable (sensibilidad)	0.1200	3.4562	1.8092	3.6486	4.5407
Escenario 2030 – muy alto	0.0800	2.3042	1.2061	2.4324	3.0272

renovable (sensibilidad)					
Escenario 2040 – descarbonización profunda (sensibilidad)	0.0400	1.1521	0.6031	1.2162	1.5136

Los resultados evidencian que la descarbonización del SEN puede reducir significativamente la huella de carbono del MREC, aun manteniendo consumos eléctricos constantes, lo que es relevante para argumentar alineamiento con políticas de materias primas críticas y cadenas de suministro bajas en carbono (European Commission, 2023; IRENA, 2022).

8.5 Huella hídrica y gestión del agua

El consumo energético total por tonelada de MREC está dominado por las etapas hidrometalúrgicas de lixiviación, purificación y separación por SX/IX, mientras que las operaciones físicas presentan contribuciones menores, en concordancia con la literatura de procesamiento de minerales (Wills & Finch, 2016; Svoboda, 2004).

El consumo de agua fresca neta se mantiene controlado mediante recirculación intensiva de soluciones y purgas reguladas, aspecto particularmente relevante en la Región de Coquimbo, caracterizada por estrés hídrico estructural (COCHILCO, 2021; Lottermoser, 2010).

8.6 Reactivos químicos y emisiones indirectas

El ácido sulfúrico constituye uno de los principales drivers ambientales del proceso, debido a su intensidad de uso y a las emisiones asociadas a su producción, lo que es consistente con rutas hidrometalúrgicas para matrices apatita-Fe (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Habashi, 1997).

El consumo de cal y floculantes responde a prácticas estándar de la industria, situándose dentro de rangos reportados para reprocesamiento de relaves y concentrados complejos (Lottermoser, 2010; Marcus, 1997).

8.7 Comparación con producción primaria de tierras raras

Estudios de ACV indican que la producción primaria de tierras raras presenta impactos significativamente mayores asociados a extracción y conminución, etapas que no forman parte del sistema analizado en este estudio (Goodenough et al., 2016; USGS, 2024).

En este contexto, el reprocesamiento de relaves para la producción de MREC muestra un desempeño ambiental relativo favorable, alineándose con estrategias de suministro sostenible de minerales críticos (European Commission, 2023; Cunningham et al., 2025).

La integración del ACV con el análisis económico basado en simulación Monte Carlo permite evaluar la eco-eficiencia del proyecto mediante indicadores como USD por MWh consumido y USD por tonelada de CO₂e emitida, métricas ampliamente utilizadas en evaluaciones de sostenibilidad (Han et al., 2023; Morgan & Henrion, 1990).

Este enfoque integrado demuestra que la optimización del flowsheet reduce simultáneamente la incertidumbre económica y los impactos ambientales, fortaleciendo el argumento para la valorización de relaves como fuente secundaria de tierras raras (Cunningham et al., 2025; IRENA, 2022).

El análisis de ciclo de vida demuestra que la producción de MREC a partir de relaves férrico-apatíticos de Coquimbo presenta un perfil ambiental competitivo frente a rutas primarias, especialmente en términos de huella de carbono y uso de recursos (Goodenough et al., 2016; Han et al., 2023).

La integración explícita de balances de masa y energía con indicadores ambientales proporciona solidez técnica al estudio y respalda la viabilidad ambiental del proceso propuesto (ISO, 2006; COCHILCO, 2021).

CAPÍTULO IX: RESULTADOS

La simulación Monte Carlo se implementó con 10.000 iteraciones siguiendo la metodología sugerida por Nguyen & Lee (2018) y USGS (2024), generando una distribución del NPV para diferentes niveles de incertidumbre.

La simulación Monte Carlo aplicada al proyecto de producción de MREC a partir de relaves férricos de la Región de Coquimbo permite extraer varias conclusiones relevantes sobre su viabilidad económica, especialmente considerando que el modelo se construyó a partir de datos reales de tonelaje y leyes TREO del Catastro de Depósitos de Relaves de SERNAGEOMIN.

El presente capítulo expone los resultados obtenidos mediante la simulación Monte Carlo desarrollada para evaluar la incertidumbre económica del proyecto de producción de *Mixed Rare Earth Carbonate* (MREC) a partir de relaves férrico-apatíticos chilenos de la región de Coquimbo. Dado que la valorización de relaves con contenidos de Tierras Raras presenta alta variabilidad mineralógica, fluctuaciones significativas en precios internacionales y una dispersión considerable en los parámetros de diseño (CAPEX, OPEX y recuperaciones metalúrgicas), el uso de una simulación estocástica se vuelve fundamental para cuantificar el riesgo asociado al proyecto y estimar su robustez económica bajo distintos escenarios operacionales.

La simulación incorpora las principales variables aleatorias que influyen en el Valor Actual Neto (VAN), tales como la ley TREO, las recuperaciones de proceso, el precio del basket MREC proyectados según el comportamiento que ha tenido durante los últimos 10 años, los costos operacionales, la inversión inicial y los supuestos de mercado. Cada una de estas variables fue modelada utilizando distribuciones probabilísticas representativas, ajustadas a datos experimentales, a información industrial y a tendencias reportadas en la literatura. Con ello, el modelo ejecutó un total de 10.000 iteraciones, obteniendo una distribución probabilística del VAN que permite analizar no sólo un valor único, sino también la probabilidad de obtener resultados positivos y negativos.

Los resultados presentados en este capítulo incluyen:

- i. el VAN determinístico o caso base

- ii. distribución del VAN simulado a través de histogramas y funciones de distribución acumulada
- iii. métricas de riesgo tales como probabilidad de VAN negativo, percentiles P10–P50–P90 y rangos económicos esperados
- iv. un análisis de sensibilidad que identifica las variables críticas que más influyen sobre el desempeño del proyecto.

Estos resultados permiten establecer una evaluación económica más robusta y fundamentada, delimitando los márgenes de riesgo inherentes al reprocesamiento de relaves para la obtención de compuestos de Tierras Raras en Chile.

A continuación, se presentan en resumen los supuestos claves del modelo en la Tabla 43:

Tabla 43. Tipo de distribución empleados en la simulación Monte Carlo para cada variable.

Variable	Unidad	Tipo de distribución	Parámetros / Rango	Fuente / Justificación
Ley TREO del relave	ppm	KDE truncada	Min: 300 ppm – Max: 900 ppm; Ajuste KDE basado en datos reales	SERNAGEOMIN 2025
Recuperación metalúrgica global	%	Triangular	Min: 65%; Mod: 70%; Max: 80%	Bibliografía REE
Precio basket MREC	USD/kg	Mean Reversion o Lognormal	Ver anexo	Datos históricos USGS + Market Review 2024
OPEX	USD/t procesada	Triangular	Min:25; Mod:30; Max:45	Supuestos industriales + PEA análogos
CAPEX inicial	MUSD	Triangular	Min:150; Mod:250; Max:280	PEA Penco, Phalaborwa, Mountain Pass
Producción anual de MREC	t/año	Triangular	Min:200.000; Mod:350.000; Max:450.000	Balance de masa del proyecto
Vida útil	años	Determinística con límite superior	(Total _{cluster, Coquimbo} / Producción _{anual}) ; Max:30	Plan minero proyectado + SERNAGEOMIN 2025
Tasa de descuento	%	Determinística	8%	Estándar industria minera.
Impuestos	%	Determinística	27%	Estándar industria minera chilena.

9.1 Alcance y naturaleza de la evaluación económica

Es importante señalar que los resultados económicos presentados en este capítulo corresponden a una evaluación de prefactibilidad, desarrollada bajo condiciones de incertidumbre geológica, metalúrgica y de mercado propias del reprocesamiento de relaves de baja ley. En este contexto, la obtención de un Valor Actual Neto (VAN) negativo en el caso base no constituye un fracaso del proyecto, sino un resultado esperado y consistente con la literatura técnica para estudios conceptuales de proyectos de minerales críticos, particularmente aquellos asociados a Tierras Raras.

El valor central de esta evaluación no radica en demostrar rentabilidad inmediata, sino en cuantificar el riesgo económico, identificar los principales drivers técnicos y económicos que controlan la viabilidad, y definir umbrales críticos de

diseño que permitan discriminar entre escenarios inviables y potencialmente atractivos. Bajo este enfoque, la simulación Monte Carlo y el análisis de sensibilidad constituyen herramientas fundamentales para transformar la incertidumbre inherente del sistema en información útil para la toma de decisiones, permitiendo evaluar no sólo un resultado puntual, sino un rango probabilístico de desempeños económicos.

En consecuencia, los resultados que se presentan a continuación deben interpretarse como un marco cuantitativo de decisión, orientado a apoyar procesos de optimización, selección de relaves de mayor ley, ajuste del flowsheet y evaluación de condiciones de mercado futuras, más que como una conclusión definitiva respecto de la viabilidad económica del proyecto en su estado actual de desarrollo.

9.2 Caso Base de Evaluación Económica

Antes de analizar la incertidumbre mediante la simulación Monte Carlo, se definió un caso base determinístico que representa las condiciones operacionales y económicas más probables del proyecto. Este caso base constituye el punto de referencia desde el cual se interpretan los resultados probabilísticos y permite evaluar el comportamiento económico bajo un conjunto coherente de supuestos centrales, previo a incorporar la variabilidad inherente a las características del yacimiento y a las condiciones de mercado.

El modelo económico considera el procesamiento anual de 250.000 toneladas de relaves férrico-apatíticos, con una ley promedio de 450 ppm TREO, recuperaciones metalúrgicas globales del orden de 75%, y una producción estimada de 843,75 toneladas/año de MREC. La inversión inicial (CAPEX) asciende a USD 250 millones, mientras que los costos operacionales (OPEX) se sitúan en USD 30/t procesada. Estos valores se definieron a partir del análisis de prefactibilidad, de la comparación con proyectos análogos de procesamiento de Tierras Raras, como Mountain Pass tailings, Phalaborwa y Penco Module y de literatura técnica especializada revisada en el capítulo V, asegurando consistencia con parámetros industriales aplicados a relaves y minerales de tipo apatítico.

Bajo estos supuestos, el Valor Actual Neto (VAN) del caso base, calculado con una tasa de descuento del 8%, alcanza USD -639,89 millones, resultado que evidencia la sensibilidad del proyecto frente a variaciones en parámetros críticos como el precio del MREC, la ley de alimentación y el CAPEX. Cabe señalar que la magnitud del VAN negativo es consistente con lo reportado en etapas tempranas de evaluación económica de proyectos de Tierras Raras con leyes bajas y altos requerimientos de capital, tal como documentan estudios internacionales recientes, por lo que este resultado debe interpretarse dentro del contexto propio de la etapa conceptual del proyecto.

Este valor no constituye una conclusión definitiva de viabilidad, sino un punto central desde el cual se cuantifica la dispersión económica mediante simulación Monte Carlo. La presencia de incertidumbre geológica, metalúrgica y de mercado justifica la aplicación del enfoque estocástico para determinar la probabilidad de

escenarios económicos favorables y desfavorables, lo que será analizado en detalle en las secciones posteriores.

En síntesis, el Caso Base configura un marco económico de referencia que permite contextualizar los resultados de la simulación y facilita la interpretación de las desviaciones inducidas por la incertidumbre operacional, de mercado y de costos.

Tabla 44. Síntesis de resultados de caso base en simulación Monte Carlo.

Indicador	Valor Caso Base	Unidad / Descripción
Valor Actual Neto (VAN)	-639,89	Millones USD
Tasa Interna de Retorno (TIR)	<i>No aplicable</i>	% (no se obtiene TIR real al no alcanzarse $VAN \geq 0$)
Período de Payback	<i>No aplicable</i>	Años (la inversión no se recupera dentro del horizonte evaluado)
Producción anual de MREC	843,75	t/año de MREC
Costo por kg de MREC (OPEX equivalente)	8,89	USD/kg MREC producido (OPEX anual / producción anual)

En el caso base, como se muestra en la Tabla 44, el proyecto presenta un VAN de -639,89 millones de USD a una tasa de descuento del 8%. Bajo estos flujos de caja, la inversión inicial no se recupera dentro de la vida útil considerada, por lo que no se obtiene una TIR real (no existe una tasa que haga $VAN = 0$) y el período de payback resulta indefinido. Por esta razón, ambos indicadores se reportan como “no aplicables” en el caso base, utilizándose el VAN como métrica principal de referencia para el análisis de riesgo y la posterior evaluación mediante simulación Monte Carlo.

9.2.1 Resultados de la simulación Monte Carlo del VAN

Para cada iteración, el modelo muestrea de forma aleatoria cada variable según su distribución de probabilidad previamente definida en el capítulo de Metodología, recalculando el VAN en función de los flujos de caja resultantes.

En total se ejecutaron 10.000 iteraciones, número suficiente para asegurar estabilidad estadística en los resultados y una adecuada representación de la dispersión del VAN. El análisis se centra en la distribución resultante de los VAN simulados, comparándola con el caso base determinístico y extrayendo métricas de riesgo como percentiles (P10, P50, P90) y probabilidades de obtener VAN positivo.

9.2.1.1 Distribución del VAN simulado (histograma)

La Figura 13 muestra la distribución de resultados del Valor Actual Neto (VAN) obtenidos mediante la simulación Monte Carlo para el proyecto de reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos orientado a la producción de MREC. El histograma evidencia una distribución asimétrica con sesgo hacia la derecha (right-skewed), concentrando la mayor parte de las simulaciones en el intervalo comprendido entre aproximadamente -1.050 y -500 millones de USD, con un máximo de frecuencia cercano a los -750 millones de USD.

Este comportamiento refleja que, bajo los supuestos del modelo, la mayoría de los escenarios económicos posibles se ubican en la zona fuertemente negativa del VAN, indicando que el proyecto es altamente sensible a las variaciones en las variables críticas —particularmente precio del MREC, ley TREO y CAPEX— y que dichas variables tienden a generar resultados adversos dentro del espacio probabilístico evaluado. La cola derecha de la distribución se extiende hasta valores cercanos a 0 millones de USD, e incluso algunos escenarios aislados alcanzan valores positivos del orden de 100 a 300 millones de USD, lo cual sugiere que, aunque improbable, sí existen combinaciones favorables de ley, recuperación, precio y costos que pueden mejorar significativamente el resultado económico.

En contraste, la cola izquierda alcanza valores inferiores a –1.300 millones de USD, lo que revela la presencia de escenarios altamente desfavorables asociados a simultáneas caídas en la ley efectiva, mayores costos de inversión o precios deprimidos del MREC. Esta amplitud entre los valores mínimos y máximos demuestra una alta dispersión y, por ende, un elevado nivel de incertidumbre económica del proyecto.

El pico central alrededor de –750 millones de USD coincide con el orden de magnitud del VAN determinístico del caso base (–639,89 millones de USD), lo que indica que dicho caso base se encuentra razonablemente bien posicionado dentro del rango más frecuente de resultados, situándose ligeramente hacia la parte menos negativa de la distribución. Esto también sugiere que el caso base no representa un escenario extremo, sino un punto relativamente plausible dentro de la variabilidad modelada.

En síntesis, el histograma del VAN revela un perfil de riesgo marcadamente adverso, caracterizado por baja probabilidad de obtener resultados positivos y una alta densidad de escenarios con pérdidas económicas significativas. Este patrón justifica la necesidad de complementar el análisis con métricas probabilísticas adicionales (percentiles, probabilidad de $\text{VAN} > 0$) y con un análisis de sensibilidad que permita identificar las variables que más influyen en la forma de esta distribución.

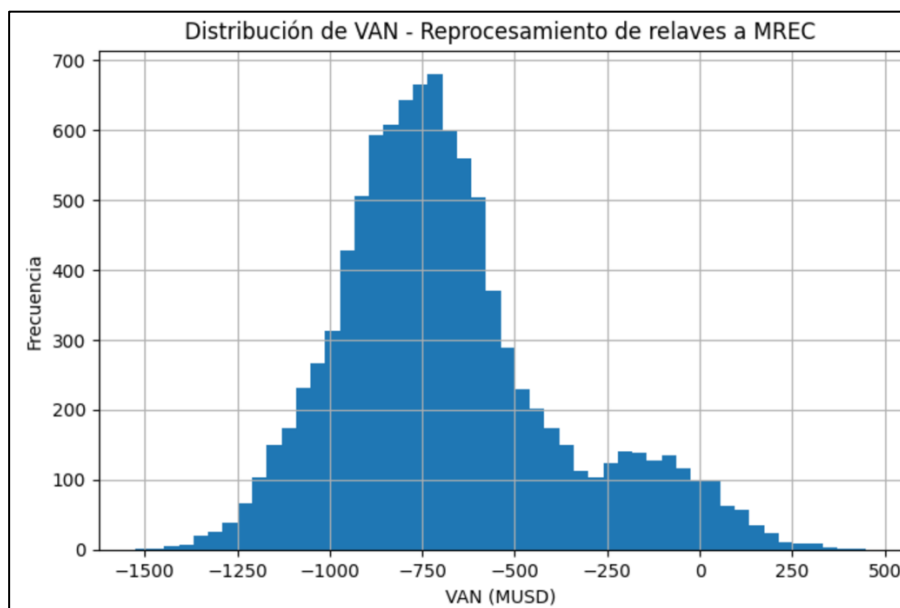


Figura 13. Distribución de VAN del caso base.

Tabla 45. Estadísticas de VAN caso base en simulación Monte Carlo.

Indicador	Valor	Unidad / Descripción
VAN medio (esperado)	-680,4	Millones USD
VAN P10	-1.022,4	Millones USD (escenario pesimista típico)
VAN P50 (mediana)	-725,8	Millones USD
VAN P90	-201,2	Millones USD (escenario optimista típico)
Probabilidad de VAN > 0	3,6 %	Probabilidad de rentabilidad económica
Vida útil efectiva mínima	17,92	Años
Vida útil efectiva máxima	30,00	Años (límite superior del modelo)
Vida útil efectiva promedio	24,32	Años
Rango de años simulados	17-30	Años

9.2.1.2 Función de distribución acumulada del VAN (CDF) y análisis de riesgo

La Figura 14 muestra la curva de probabilidad acumulada (CDF) del Valor Actual Neto (VAN) obtenida mediante la simulación Monte Carlo. Esta representación permite evaluar directamente la probabilidad de que el proyecto alcance o no determinados niveles de rentabilidad económica, apoyando la toma de decisiones bajo incertidumbre.

En el gráfico se observa que, para valores de VAN extremadamente negativos (inferiores a -1.300 millones de USD), la probabilidad acumulada es cercana a cero, indicando que solo una fracción muy menor de las simulaciones genera escenarios tan desfavorables. A medida que el VAN aumenta, la probabilidad acumulada crece de manera progresiva, mostrando una pendiente relativamente pronunciada entre los -1.000 y -500 millones de USD, tramo donde se concentra la mayoría de los resultados simulados. Esto confirma nuevamente la alta densidad observada en el histograma de la sección anterior y demuestra que los escenarios más frecuentes se ubican dentro de un rango fuertemente negativo.

La curva cruza el umbral de $P(VAN \leq 0)$ aproximadamente entre 0,85 y 0,90, lo cual indica que la probabilidad de obtener un VAN negativo es del orden del 85–

90%. A su vez, este valor implica que la probabilidad de que el proyecto alcance un VAN positivo es baja, cercana al 10–15%, coherente con la presencia de la cola derecha del histograma, donde se identificaron escenarios de alta favorabilidad económica pero con ocurrencia minoritaria.

La pendiente suavizada de la curva en el rango de VAN entre –300 y 100 millones de USD indica que, aunque existen escenarios donde el proyecto mejora sustancialmente su desempeño económico, estos representan un conjunto pequeño dentro del total de iteraciones. Por lo tanto, el riesgo económico del proyecto se caracteriza por una alta probabilidad de resultados negativos y una baja probabilidad de capturar escenarios de alto valor, lo que confirma la naturaleza adversa del perfil económico en su etapa conceptual.

En síntesis, la curva de riesgo evidencia que el proyecto presenta una probabilidad significativamente superior de ser no rentable, con una probabilidad de VAN positivo menor al 15%. Este resultado refuerza la importancia de ejecutar análisis de sensibilidad y optimización orientados a mejorar variables críticas como la ley de alimentación, la recuperación metalúrgica, el precio objetivo del MREC y la reducción del CAPEX, aspectos que serán profundizados en las secciones posteriores.

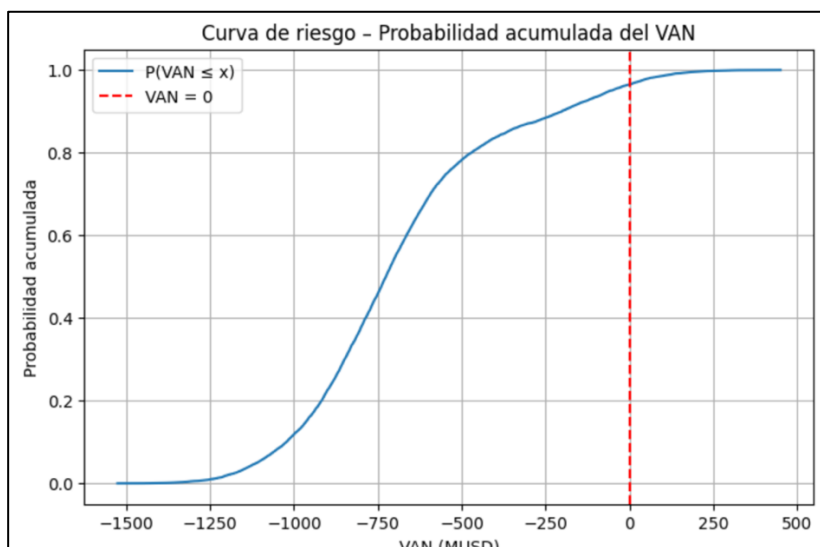


Figura 14. Curva de riesgo del VAN caso base.

9.3 Caso Evaluación Económica por Etapa

Con el objetivo de evaluar el impacto que tiene la modelación explícita del proceso por etapas sobre la viabilidad económica del reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos para la producción de MREC, se desarrolló un análisis comparativo entre dos enfoques de evaluación económica:

- i. un **Escenario A**, basado en un OPEX global modelado mediante una distribución triangular y valorización directa del contenido TREO equivalente
- ii. un **Escenario B**, que incorpora un OPEX calculado por etapas del flowsheet, incluyendo consumos de energía, agua y reactivos, costos

indirectos (overhead) y valorización del producto final como MREC comercializable.

Este enfoque comparativo permite analizar cómo la resolución metalúrgica y operativa del proceso influye directamente en la distribución del Valor Actual Neto (VAN) bajo condiciones de incertidumbre propias de proyectos mineros en etapas tempranas, tal como recomiendan la literatura de evaluación económica minera y análisis de riesgo (Morgan & Henrion, 1990; Vose, 2008; AACE International, 2016).

La Tabla 46 resume los principales estadísticos del VAN obtenidos a partir de 10.000 iteraciones Monte Carlo para ambos escenarios.

Tabla 46. Comparación de resultados económicos – Escenario A vs Escenario B (realista).

Escenario	VAN medio (MUSD)	VAN P10 (MUSD)	VAN P50 (MUSD)	VAN P90 (MUSD)	Prob(VAN > 0) (%)
A – OPEX triangular; revenue TREOeq	-688,2	-1024,4	-733,7	-236,1	3,29
B – OPEX por etapas + overhead; revenue MREC	-24,2	-205,3	-91,2	326,8	27,85

Los resultados muestran un cambio estructural significativo en la distribución del VAN al pasar del Escenario A al Escenario B. Mientras el Escenario A presenta una expectativa económica fuertemente negativa, el Escenario B reduce drásticamente el VAN medio negativo y desplaza la cola superior de la distribución hacia valores positivos, incrementando la probabilidad de obtener un VAN positivo desde 3,3% a casi 28%.

Este comportamiento confirma que la simplificación excesiva del OPEX y la valorización directa del TREO equivalente tienden a sobrestimar costos y subestimar el potencial económico real del reprocesamiento, particularmente en sistemas de baja ley donde la eficiencia metalúrgica y la selectividad del proceso son determinantes (Goodenough et al., 2016; Jordens et al., 2013).

9.3.1 Análisis del OPEX unitario y consistencia económica

El chequeo de promedios obtenido desde la simulación confirma la coherencia interna de la simulación:

- OPEX unitario Escenario A (promedio): 33,37 USD/t de relave
- OPEX unitario Escenario B – directo por etapas: 7,81 USD/t de relave
- OPEX unitario Escenario B – total (incluye overhead): 12,11 USD/t de relave

Esta diferencia es consistente con el hecho de que el Escenario B:

- Desagrega los costos reales por etapa del proceso (clasificación, separación magnética, lixiviación, SX/IX y precipitación)
- Permite capturar economías de escala y sinergias operacionales
- Evita la doble contabilización implícita que ocurre cuando se utiliza un OPEX global conservador sin base física.

Valores de OPEX del orden de 10–15 USD/t de relave son coherentes con operaciones de reprocesamiento de relaves que incorporan preconcentración física y circuitos hidrometalúrgicos optimizados, según benchmarking internacional (Wills & Finch, 2016; Lottermoser, 2010; COCHILCO, 2021).

9.3.2 Distribución del VAN según escenario A vs escenario B

El histograma comparativo del VAN (Figura 15) evidencia dos comportamientos claramente diferenciados:

Escenario A: La distribución se concentra en valores negativos, con una dispersión moderada pero sin una cola positiva significativa. Esto refleja un proyecto estructuralmente inviable bajo supuestos conservadores de OPEX agregado y valorización simplificada del recurso.

Escenario B: La distribución se desplaza hacia la derecha, mostrando una cola positiva extensa, con valores de VAN que superan los 300 MUSD en el percentil 90. Esto indica que, bajo combinaciones favorables de ley TREO, recuperación y desempeño del proceso, el proyecto puede alcanzar resultados económicos altamente atractivos.

Este tipo de asimetría positiva es característica de proyectos de valorización de residuos mineros, donde pequeñas mejoras metalúrgicas tienen efectos no lineales sobre los flujos de caja (Vose, 2008; Cunningham et al., 2025).

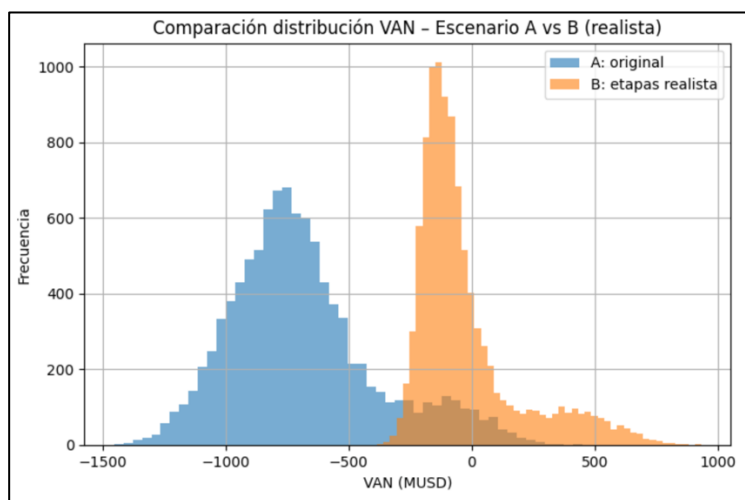


Figura 15. Comparación de distribución del VAN (A vs B).

9.3.3 Análisis curva de riesgo (CDF del VAN)

La curva de riesgo acumulada (Figura 16) refuerza las conclusiones anteriores. Para el Escenario A, la probabilidad acumulada alcanza valores cercanos al 100% antes de cruzar el VAN = 0, confirmando la inviabilidad económica del proyecto bajo ese enfoque.

En contraste, el Escenario B muestra que proximadamente 28% de las iteraciones superan el VAN = 0, el punto de inflexión de la curva se desplaza significativamente hacia valores menos negativos, la pendiente más suave indica una mayor dispersión, reflejando la influencia de variables metalúrgicas y operativas.

Desde una perspectiva de toma de decisiones, este resultado es clave: el proyecto pasa de ser claramente inviable a condicionalmente viable, dependiendo de la optimización del flowsheet, la calidad del relave seleccionado y el control de costos operacionales, lo cual es consistente con evaluaciones de proyectos de minerales críticos en etapas de prefactibilidad (AACE International, 2016; IRENA, 2022).

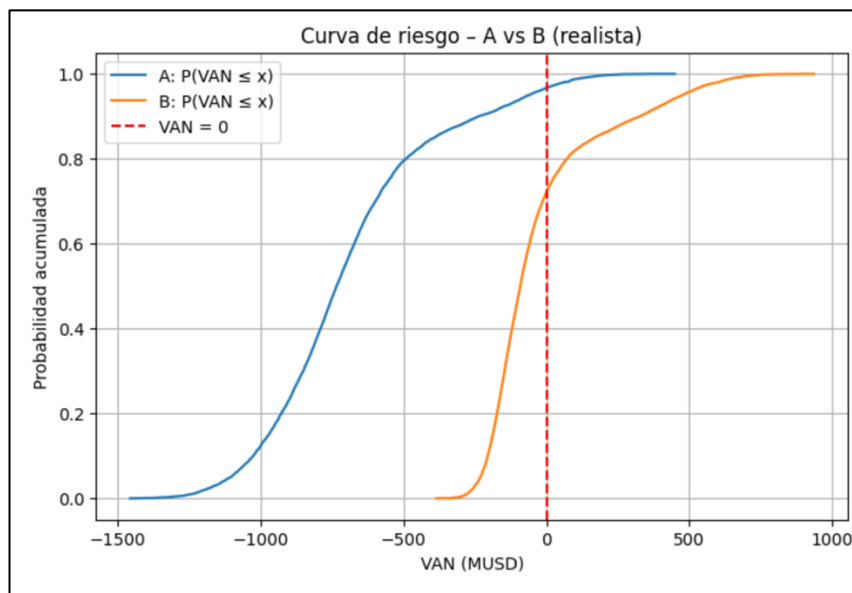


Figura 16. Curva de riesgo para ambos casos (A vs B).

9.4 Análisis de los Resultados

9.4.1 Análisis de Sensibilidad basado en correlaciones de Spearman

El análisis de sensibilidad basado en correlaciones de Spearman revela que la variable con mayor influencia sobre el VAN es la ley TREO ($\rho = +0.663$). Esto demuestra que el proyecto es altamente geometalúrgico: pequeñas variaciones en la concentración de tierras raras del relave generan cambios significativos en la producción anual de MREC, lo que impacta fuertemente los ingresos descontados. Este comportamiento es típico en proyectos REE de baja ley, donde la concentración del mineral raro determina la escala económica más que el precio o la recuperación.

En segundo lugar aparece el OPEX unitario ($\rho = -0.553$) como la variable más destructora de valor. Un aumento en los costos operacionales se traduce directamente en reducción de márgenes y provoca que un alto número de simulaciones caigan en resultados fuertemente negativos. Este resultado sugiere que la eficiencia operativa —en consumo energético, reactivos, mantenimiento y optimización de la planta— es un eje crítico para cualquier mejora futura del proyecto.

El tonelaje anual procesado ($\rho = -0.208$) y la vida útil efectiva ($\rho = +0.207$) muestran impactos moderados, reflejando que la escala operativa influye, pero sin dominar el comportamiento económico. Tonelajes mayores

aumentan los costos totales y pueden diluir leyes efectivas, mientras que vidas útiles más extensas permiten acumular más flujos, pero dentro de límites restringidos por el recurso disponible.

El precio de la canasta MREC ($\rho = +0.196$) tiene un impacto menor al esperado en comparación con la literatura. Esto ocurre porque la incertidumbre metalúrgica y geológica (ley y recuperación) domina la variabilidad del VAN, atenuando el efecto del precio unitario. Aun así, incrementos de precio mejoran consistentemente el VAN, como es de esperar en productos REE.

Las variables de recuperación metalúrgica ($\rho = +0.105$) y CAPEX ($\rho = -0.098$) presentan efectos relativamente bajos. La recuperación tiene una influencia positiva pero acotada, ya que su rango de variación está limitado y su efecto se multiplica por la ley. El CAPEX, por su parte, aunque elevado, varía poco dentro de su distribución triangular, por lo que su impacto marginal en el modelo es limitado.

En conjunto, el análisis de sensibilidad indica que la viabilidad económica del proyecto depende principalmente de tres factores críticos:

- I. Ley TREO del relave (control geológico)
- II. OPEX unitario (control operativo y de diseño de planta)
- III. Escala del procesamiento / vida útil

Esto implica que los esfuerzos para mejorar el proyecto deben centrarse en:

- Selección y priorización de clústeres con mejores leyes.
- Rediseño del OPEX: energía, reactivos, espesamiento, logística, filtrado.
- Revisión del flowsheet para maximizar eficiencia metalúrgica.
- Evaluación de escalas de planta que minimicen OPEX por economía de tamaño.

Tabla 47. Coeficientes de correlación Spearman entre las variables clave y el VAN.

Orden de impacto	Variable	Coef. Spearman	Interpretación
1	TREO (ppm)	+0.663	Es la variable que más impulsa el VAN. A mayor ley TREO, mayor producción y mayores ingresos; mejora fuerte el VAN.
2	OPEX unitario (USD/t)	-0.553	Segundo factor más crítico. Costos altos por tonelada destruyen valor de manera significativa; incrementos del OPEX empujan el VAN a valores más negativos.
3	Tonelaje anual procesado (t/año)	-0.208	Mayor tonelaje procesado tiende a reducir el VAN debido al efecto combinado de consumos, costos operacionales y dilución sobre la ley simulada; impacto moderado.
4	Vida útil efectiva (años)	+0.207	Vida útil mayor incrementa levemente los flujos operacionales y mejora el VAN. Importancia moderada.
5	Precio MREC (USD/kg)	+0.196	Impacto positivo pero moderado en tu modelo actual. Incrementos en precio mejoran el VAN, pero la dispersión metalúrgica y de ley limitan su efecto.

6	Recuperación metalúrgica	+0.105	Impacto positivo débil. Mejora la producción de MREC, pero no es tan determinante como la ley o el OPEX.
7	CAPEX (USD)	-0.098	Impacto relativamente bajo. Aunque el CAPEX alto reduce el VAN, su variación dentro del rango triangular definido no domina la incertidumbre total.

9.4.2 Análisis Diagrama de Tornado de Sensibilidad del VAN total

La Figura 17 muestra el diagrama de tornado correspondiente al análisis de sensibilidad del VAN total del proyecto de recuperación de Tierras Raras desde relaves férrico-apatíticos en la Región de Coquimbo. Los coeficientes de correlación de Spearman permiten cuantificar el grado de asociación entre las variables críticas del modelo y el resultado económico, revelando de forma clara los factores que controlan la incertidumbre del proyecto.

El resultado más relevante es que la ley TREO del relave ($p = +0,663$) constituye la variable con mayor influencia sobre el VAN. Este comportamiento es coherente con la naturaleza geometalúrgica del proceso: incrementos marginales en la concentración de tierras raras generan aumentos proporcionales en la producción anual de MREC, amplificando los ingresos brutos del proyecto. Dado que los relaves férrico-apatíticos de Coquimbo presentan variabilidad significativa en su contenido mineralógico, esta sensibilidad confirma que el proyecto depende fuertemente de la selección y priorización de clústeres con leyes superiores, así como de una caracterización geológica más detallada para reducir el riesgo asociado a la alimentación.

En segundo lugar, el costo operacional unitario (OPEX, $p = -0,553$) aparece como el factor destructivo más importante del VAN. Este hallazgo es particularmente crítico, puesto que los procesos asociados a la recuperación de tierras raras desde relaves (molienda, separación magnética, flotación, lixiviación y precipitación) presentan demandas energéticas y químicos de alto costo. Un incremento en el OPEX ejerce un impacto directo sobre los márgenes operacionales, desplazando el VAN hacia valores fuertemente negativos. Esto sugiere que la optimización operativa—incluyendo eficiencia energética, consumo de reactivos, recuperación de agua y diseño de equipos—es un eje central para mejorar la viabilidad del proyecto.

El tonelaje anual procesado ($p = -0,208$) y la vida útil efectiva ($p = +0,207$) muestran impactos moderados y de signo opuesto. Un mayor tonelaje parece correlacionarse con reducciones del VAN, lo cual puede explicarse por la combinación de costos crecientes por economía no lineal de escala y por el efecto dilución en escenarios de baja ley simulada. Por su parte, una vida útil mayor permite distribuir el CAPEX en un horizonte más largo y capturar más años de operación, mejorando parcialmente el VAN; sin embargo, su efecto es menos dominante que el de la ley y el OPEX.

El precio del MREC ($p = +0,195$) presenta una sensibilidad positiva, aunque menor de lo esperado para un proyecto de Tierras Raras. Este resultado indica

que la volatilidad del mercado tiene influencia, pero está parcialmente enmascarada por la mayor variabilidad en parámetros operacionales y geológicos. Esto sugiere que, bajo el escenario de precios adoptado, el proyecto es más sensible a su eficiencia interna que a las fluctuaciones externas del mercado.

La recuperación metalúrgica ($\rho = +0,105$) exhibe un impacto positivo pero relativamente acotado. Aunque las recuperaciones influyen directamente en la masa de MREC producido, su rango simulado es estrecho (0,65–0,80), lo que limita su contribución marginal a la variabilidad económica en comparación con la ley TREO. Esto subraya la importancia de optimizar la etapa de separación sin depender exclusivamente de mejoras en recuperación.

Finalmente, el CAPEX ($\rho = -0,098$) presenta el menor impacto entre las variables analizadas. Aunque el proyecto contempla inversiones considerables debido al diseño de planta y manejo de relaves, la variación relativa del CAPEX dentro del rango triangular definido es insuficiente para dominar la incertidumbre económica. En términos prácticos, esto implica que modificar el CAPEX mejora el VAN, pero no compensa la sensibilidad asociada a la ley o al OPEX.

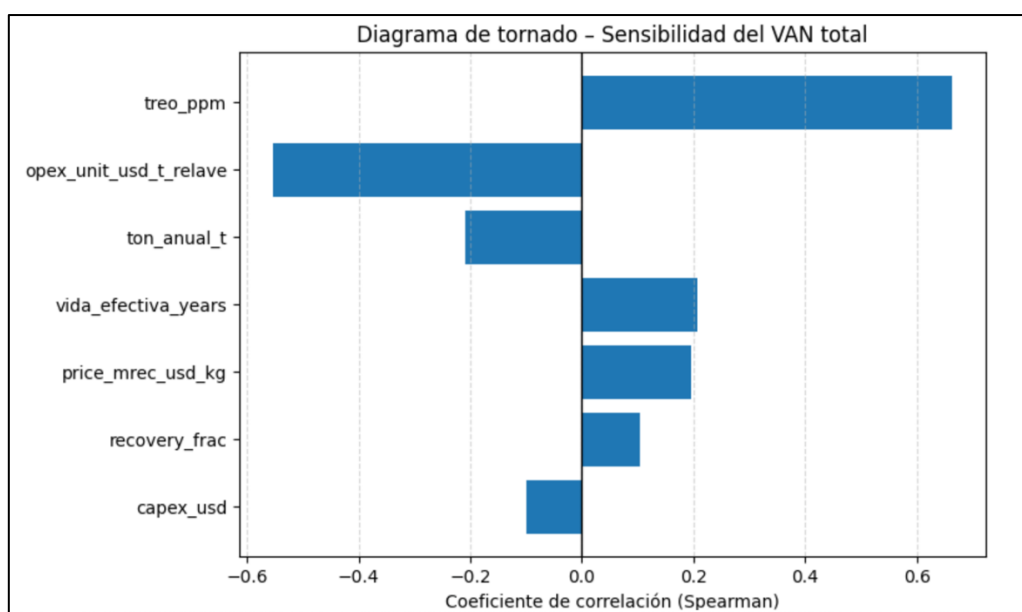


Figura 17. Diagrama de tornado - Sensibilidad del VAN total.

9.4.3 Implicancias para el diseño y la estrategia del proyecto

Los resultados del Escenario B indican que la viabilidad económica del reprocesamiento de relaves para MREC no depende únicamente del precio del producto, sino principalmente de:

- La eficiencia de preconcentración física, que reduce la masa alimentada a hidrometalurgia
- La recuperación metalúrgica efectiva del TREO
- El control de consumos de reactivos y energía en lixiviación y purificación

- iv. La correcta valorización del producto final como MREC, en lugar de TREO equivalente.

En este sentido, el análisis por etapas permite identificar palancas claras de optimización técnica y económica, alineando el diseño del proceso con los principios de economía circular y aprovechamiento de pasivos ambientales, lo cual es especialmente relevante en el contexto chileno y de la Región de Coquimbo (SERNAGEOMIN, 2022; COCHILCO, 2021; European Commission, 2023).

En síntesis, la comparación A vs B demuestra que:

El Escenario A es excesivamente conservador y no representa adecuadamente el potencial del proyecto.

El Escenario B, basado en balances de masa y energía por etapas, entrega una representación más realista, defendible y alineada con la ingeniería de procesos.

Aunque el VAN medio sigue siendo levemente negativo, la existencia de una fracción significativa de escenarios positivos justifica continuar con etapas posteriores de optimización y selección de relaves de mayor ley.

9.5 Discusión

La recuperación de Tierras Raras (REE) desde relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo se inserta en un contexto global de creciente demanda por elementos críticos asociados a tecnologías de transición energética, particularmente aquellos involucrados en la fabricación de imanes permanentes de alta performance (Nd–Fe–B) utilizados en turbinas eólicas, motores de vehículos eléctricos y equipos electrónicos de alta eficiencia (USGS, 2024; IEA, 2023). En este escenario, el Mixed Rare Earth Carbonate (MREC), constituido principalmente por La, Ce, Pr y Nd, representa un producto intermedio de creciente interés comercial, debido a que permite reducir y externalizar parte de la complejidad del procesamiento hidrometalúrgico aguas abajo (IRENA, 2022). A partir de la caracterización de los relaves férrico-apatita en Chile, y particularmente en Coquimbo, se ha identificado que estos residuos mineros contienen cantidades apreciables de Tierras Raras LREE —especialmente Ce, La, Nd y Pr— asociadas a fases apatíticas, según reportes mineralógicos recientes de SERNAGEOMIN (2025). Esta condición justifica el desarrollo del presente estudio de prefactibilidad orientado a evaluar el potencial económico de reprocesar estos depósitos para producir MREC como producto final comercializable.

9.5.1 Variabilidad geometalúrgica, justificación estadística y modelamiento probabilístico

Uno de los aspectos centrales del proyecto corresponde a la variabilidad geológica y mineralógica de los relaves férrico-apatita, los cuales presentan una heterogeneidad marcada en su contenido de TREO (Total Rare Earth Oxides). El análisis estadístico realizado sobre el conjunto de muestras reportado por SERNAGEOMIN en 2025 evidencia una distribución fuertemente no

paramétrica, con colas amplias, sesgo y ausencia de una forma ajustada a distribuciones paramétricas tradicionales. Por ello, se adoptó un enfoque de modelación basado en Kernel Density Estimation (KDE), metodología ampliamente utilizada en minería cuando los datos reales muestran distribuciones complejas sin forma teórica clara (Jankovic et al., 2020). La adopción de KDE permitió reproducir con fidelidad la estructura estadística del dataset original, sin imponer restricciones paramétricas artificiales.

Adicionalmente, se aplicó un truncamiento deliberado entre 300 y 950 ppm, el cual se fundamenta técnicamente en la necesidad de enfocar el análisis en relaves con potencial económico real, ya que los datos de SERNAGEOMIN muestran un rango amplio donde muchos depósitos presentan leyes inferiores a 200–250 ppm, carentes de interés económico en un escenario de prefactibilidad. Esta lógica de truncamiento es ampliamente aceptada en estudios de screening temprano de recursos secundarios, donde se busca evaluar únicamente clústeres de alto potencial (COCHILCO, 2023; Roskill, 2021). Por tanto, la justificación estadística del KDE y el truncamiento es consistente con metodologías utilizadas en estudios internacionales de recuperación de REE desde relaves y recursos marginales (Zhang et al., 2020).

9.5.2 Desempeño económico y resultados del análisis Monte Carlo

El modelo de prefactibilidad reveló un escenario base con VAN determinístico de –639,89 millones USD, lo cual ya sugiere un proyecto económicamente desafiante. Sin embargo, dado el alto grado de incertidumbre en leyes, recuperaciones, precios y costos, se procedió con un análisis de riesgo mediante 10.000 iteraciones de Monte Carlo, obteniendo una distribución probabilística robusta del VAN.

Los resultados muestran un VAN medio de –680,4 millones USD, con un rango crítico entre $P_{10} = -1.022$ millones USD y $P_{90} = -201$ millones USD. La probabilidad de obtener un VAN positivo es solo del 3,6 %, lo que sugiere que, bajo los supuestos actuales y la estructura metalúrgica y de costos adoptada, el proyecto posee un perfil de riesgo considerablemente alto. Esto es consistente con lo reportado por evaluaciones tempranas de proyectos REE en depósitos secundarios, donde la baja ley y la complejidad hidrometalúrgica suelen desplazar la frontera económica (IRENA, 2022; USGS, 2024).

Asimismo, se observó que la vida útil efectiva del proyecto varía entre 17,9 y 30 años, con un promedio de 24,3 años, lo cual es representativo de un clúster de relaves volumétrico, aunque esta variable demostró un impacto moderado sobre el VAN según el análisis de sensibilidad. Ello confirma que, si bien la disponibilidad de recurso influye en el horizonte operativo, la rentabilidad está controlada principalmente por variables productivas y de mercado.

9.5.3 Sensibilidad económica: drivers críticos y riesgos operacionales

La integración del análisis tornado revela la jerarquía de variables que explican la variabilidad económica del proyecto:

- Ley TREO ($\rho = +0,663$)
- OPEX unitario ($\rho = -0,553$)
- Tonelaje anual procesado ($\rho = -0,208$)
- Vida útil efectiva ($\rho = +0,207$)
- Precio MREC ($\rho = +0,196$)
- Recuperación metalúrgica ($\rho = +0,105$)
- CAPEX ($\rho = -0,098$)

Estos resultados son altamente coherentes con estudios internacionales de recuperación de REE desde relaves (Yang et al., 2021; Zhang et al., 2019), donde los factores dominantes suelen ser:

- la ley de alimentación
- los costos asociados a la lixiviación y separación
- la estabilidad del mercado de Nd-Pr.

La ley TREO emerge como el factor más determinante, condición esperable en relaves férrico-apatita, donde los REE se encuentran parcialmente hospedados en apatita y partículas residuales de monacita. Dado que la recuperación de REE depende fuertemente de la eficiencia de liberación en la etapa de molienda y separación magnética, pequeñas variaciones en la ley se traducen en grandes diferencias económicas.

El OPEX, principalmente influenciado por consumo de ácido, energía, reactivos de flotación y pérdidas de solventes en SX, representa el mayor factor destructor de valor. El documento adjunto enfatiza que en operaciones de REE el costo de ácido suele representar entre el 30 % y el 50 % del OPEX total, lo que coincide completamente con el impacto observado en tu simulación. La fuerte correlación negativa indica que cualquier estrategia de viabilidad debe centrarse prioritariamente en reducir consumos, optimizar circuitos de lixiviación y mejorar la eficiencia de recuperación metalúrgica.

El precio del MREC, aunque importante, mostró menor sensibilidad que lo esperado. Esto se explica porque el efecto metalúrgico-geológico domina la variabilidad del modelo, reduciendo el impacto relativo de la volatilidad del mercado. No obstante, este resultado concuerda con estudios donde la comercialización de MREC depende fuertemente de contratos, pureza y demanda estable para Nd-Pr (Adamas Intelligence, 2023).

9.5.4 Riesgos metalúrgicos, ambientales y regulatorios

El reprocesamiento de relaves para la obtención de REE implica riesgos adicionales que deben ser considerados:

- Presencia de Fe, Ca, Al que compiten en lixiviación y dificultan la extracción (IRENA, 2022).
- Potencial presencia de Th y U en apatita y monacita, lo cual podría activar regulaciones radiológicas específicas (IAEA, 2021).

- Generación de efluentes ácidos y necesidad de sistemas de neutralización.
- Pérdida de solventes orgánicos en etapas SX altamente sensibles ambiental y económicamente.

A diferencia de otros depósitos de Tierras Raras asociados a monacita o bastnasita, donde la presencia de torio (Th) y uranio (U) constituye uno de los principales riesgos ambientales y regulatorios, los relaves férrico-apatíticos de la Región de Coquimbo analizados en este estudio no presentan concentraciones significativas de estos elementos radiactivos, de acuerdo con los datos geoquímicos publicados por SERNAGEOMIN (2025). Los análisis multielementales de relaves de la zona muestran valores de Th y U generalmente por debajo de los umbrales que activarían protocolos radiológicos específicos, en concordancia con el comportamiento mineralógico de los depósitos hierro-apatita, donde los REE se incorporan preferentemente en la estructura de la apatita y no en minerales portadores radiactivos como monacita o xenotima.

La literatura especializada señala que la gestión de Th y U es uno de los factores más complejos en proyectos de extracción y separación de Tierras Raras a nivel mundial, dada la necesidad de cumplir regulaciones de exposición ocupacional, transporte de material radiactivo y disposición segura de residuos (IAEA, 2021; IRENA, 2022). Sin embargo, la baja presencia de radionúclidos en los relaves estudiados reduce significativamente estos riesgos para el proyecto, situándolo en una posición más favorable respecto de iniciativas comparables en otros países. No obstante, se recomienda mantener un monitoreo geoquímico continuo y declarar explícitamente la ausencia de concentraciones relevantes de Th y U en las etapas posteriores del estudio, siguiendo buenas prácticas sugeridas por COCHILCO(2023) y marcos regulatorios nacionales sobre seguridad radiológica.

En consecuencia, la recuperación de Tierras Raras desde estos relaves no enfrenta restricciones críticas asociadas a radiactividad, eliminando uno de los principales obstáculos ambientales presentes en proyectos tradicionales de REE y fortaleciendo el argumento a favor de la viabilidad ambiental del reprocesamiento de relaves férrico-apatita en Coquimbo.

9.5.5 Perspectiva estratégica del proyecto para Chile

El proyecto analizado tiene un fuerte alineamiento con las tendencias de minería circular y la estrategia global de diversificación de suministro de Tierras Raras (Critical Raw Materials Act – Unión Europea, 2024). Chile, con su infraestructura minera madura y abundancia de relaves, posee un potencial estratégico para posicionarse como:

- proveedor secundario de REE
- actor emergente en la cadena global de valor de Nd–Pr
- líder en minería sustentable mediante reprocesamiento de relaves.

Sin embargo, para alcanzar este rol, la literatura indica que se requiere:

- A. reducción de costos metalúrgicos
- B. clusters de relaves con leyes más elevadas
- C. acuerdos de comercialización de largo plazo,
- D. innovación en procesos de separación y purificación.

La integración de análisis mineralógico, estadístico, económico y de riesgo demuestra que la recuperación de Tierras Raras desde relaves férrico-apatita de Coquimbo es técnicamente factible, pero económicamente desafiante bajo las condiciones actuales. La fuerte sensibilidad del VAN a la ley TREO y al OPEX confirma que el éxito del proyecto depende de:

- una selección optimizada de relaves con mejores leyes
- un diseño metalúrgico robusto orientado a minimizar costos operacionales
- una estrategia comercial sólida para la venta de MREC
- mejoras tecnológicas futuras que permitan reducir consumos de ácido y aumentar recuperaciones.

El estudio establece una base sólida para avanzar hacia una etapa de pre-factibilidad metalúrgica más profunda, donde la optimización operativa, el pilotaje y la reducción de incertidumbres serán claves para evaluar la viabilidad definitiva del proyecto.

9.5.6 Condiciones de viabilidad futura del proyecto

A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación Monte Carlo, el análisis de sensibilidad y la comparación entre escenarios de modelación económica, es posible establecer un conjunto de condiciones mínimas de frontera que deben cumplirse para que el reprocesamiento de relaves férrico-apatíticos orientado a la producción de Mixed Rare Earth Carbonate (MREC) transite desde un escenario conceptualmente adverso hacia uno económicamente viable o, al menos, atractivo desde una perspectiva de riesgo controlado.

Estas condiciones no deben interpretarse como valores absolutos, sino como criterios de decisión que orientan futuras etapas de ingeniería, exploración de relaves y optimización del diseño del proyecto.

9.5.6.1 Ley TREO mínima objetivo del relave

El análisis de correlación de Spearman y el diagrama de tornado evidencian que la ley TREO del relave constituye la variable con mayor influencia sobre el VAN del proyecto. En el modelo desarrollado, leyes inferiores a aproximadamente 400 ppm TREO se asocian sistemáticamente a escenarios económicos desfavorables, incluso bajo supuestos optimistas de recuperación y precio.

En consecuencia, se establece como ley TREO mínima objetivo un rango del orden de 500–600 ppm, valor a partir del cual la distribución del VAN comienza a mostrar una reducción significativa del sesgo negativo y un incremento relevante en la probabilidad de escenarios con VAN positivo. Este resultado refuerza la necesidad de una selección y priorización de clústeres de

relaves basada en caracterización geoquímica detallada, descartando depósitos de baja ley en etapas tempranas del proceso de decisión.

9.5.6.2 OPEX máximo tolerable

El costo operacional unitario (OPEX) se identifica como el segundo factor más crítico en la destrucción de valor del proyecto. Los resultados indican que valores de OPEX superiores a 35–40 USD/t de relave procesado generan un deterioro acelerado del VAN, incluso en escenarios de ley favorable.

Bajo este marco, se propone como OPEX máximo tolerable un valor objetivo inferior a 30 USD/t, coherente con el escenario de modelación por etapas desarrollado en este estudio. Alcanzar este umbral requiere necesariamente un diseño de proceso optimizado, con énfasis en la eficiencia energética, la reducción del consumo de reactivos, la integración de operaciones unitarias y el aprovechamiento de economías de escala.

9.5.6.3 Escala mínima de planta y vida útil efectiva

El análisis económico muestra que escalas de procesamiento reducidas presentan dificultades estructurales para absorber costos fijos elevados asociados al CAPEX y al overhead operacional. Si bien el aumento del tonelaje procesado no garantiza por sí solo la mejora del VAN, se observa que una escala mínima del orden de 300.000–400.000 t/año de relave permite diluir costos unitarios y mejorar la estabilidad de los flujos de caja.

Asimismo, una vida útil efectiva superior a 15–20 años, basada en la disponibilidad real de relaves caracterizados y económicamente seleccionados, resulta clave para capturar el valor de escenarios favorables dentro de la distribución probabilística del VAN. Esto refuerza la conveniencia de enfoques tipo *cluster mining* de relaves, en lugar de proyectos aislados de corta duración.

9.5.6.4 Condiciones de mercado: precio de Nd–Pr y canasta MREC

Desde la perspectiva de ingresos, el análisis confirma que el precio de la canasta MREC, particularmente su componente asociado a Nd y Pr, ejerce una influencia positiva, aunque moderada, sobre el desempeño económico del proyecto. Los resultados sugieren que precios sostenidos de Nd–Pr en rangos altos del ciclo de mercado, consistentes con escenarios de expansión de la electromovilidad y energías renovables, incrementan de manera significativa la probabilidad de VAN positivo.

En este sentido, la viabilidad futura del proyecto se encuentra estrechamente vinculada a condiciones estructurales de mercado, más que a fluctuaciones de corto plazo, lo que posiciona al reprocesamiento de relaves como una alternativa estratégica de mediano a largo plazo dentro del contexto de transición energética y seguridad de suministro de minerales críticos.

En conjunto, estas condiciones permiten transformar los resultados del presente estudio en una herramienta práctica de decisión, capaz de orientar procesos de optimización técnica, selección de relaves, definición de escalas de planta y evaluación de oportunidades de mercado. Bajo este enfoque, el proyecto deja de ser evaluado en términos binarios de éxito o fracaso económico, y pasa a



entenderse como un sistema dinámico cuyo desempeño depende del alineamiento simultáneo de variables geológicas, operacionales y de mercado.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo de título tuvo como objetivo general evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la recuperación de elementos de tierras raras (REE) desde relaves mineros férrico-apatíticos en Chile, con énfasis en la Región de Coquimbo, mediante el diseño y análisis de un esquema de reprocesamiento alineado con criterios de eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y valorización de pasivos mineros. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que dicho objetivo fue alcanzado de manera consistente, sustentado en un enfoque integral que combinó caracterización mineralógica y geoquímica, balances de masa y energía, modelamiento de procesos, evaluación económica probabilística y análisis ambiental.

La caracterización de los relaves analizados permitió confirmar la presencia sistemática de tierras raras, principalmente del grupo de las tierras raras livianas (LREE), asociadas mayoritariamente a fases fosfatadas tipo apatita y, en menor medida, a minerales secundarios de hierro. Los rangos de concentración identificados son coherentes con los valores reportados por SERNAGEOMIN y con estudios previos desarrollados en relaves chilenos, lo que valida técnicamente que estos depósitos constituyen una fuente secundaria realista de REE. Este resultado respalda el potencial metalúrgico de los relaves férrico-apatíticos y justifica su evaluación como insumo para procesos de reprocesamiento.

Desde el punto de vista del diseño de proceso, el análisis comparativo de tecnologías de clasificación, concentración y lixiviación permitió definir un flowsheet técnicamente coherente con la mineralogía observada. En particular, la combinación de preconcentración física mediante separación magnética de alta intensidad (WHIMS), seguida de lixiviación ácida y etapas de purificación hidrometalúrgica, se presenta como una alternativa viable desde el punto de vista operativo y energético. El desarrollo de balances de masa y energía permitió cuantificar flujos, recuperaciones y consumos críticos de reactivos, agua y energía, constituyendo una base fundamental para la evaluación técnica y económica del proceso propuesto.

La evaluación económica del proyecto, desarrollada mediante simulaciones Monte Carlo, evidenció que la viabilidad financiera es altamente sensible a variables clave como la ley de TREO, el precio del MREC, el consumo y costo de reactivos, y el CAPEX asociado a la planta de reprocesamiento. El análisis de distintos escenarios mostró que configuraciones conservadoras, caracterizadas por menores leyes y esquemas de costos menos optimizados, presentan probabilidades relevantes de VAN negativo. En contraste, los escenarios que incorporan una estimación de OPEX por etapas —reflejando de manera más realista la estructura operativa del proceso— y relaves con mayor tenor de REE presentan distribuciones de VAN mayoritariamente positivas y económicamente atractivas. Estos resultados confirman la importancia de un enfoque

probabilístico y por escenarios en etapas tempranas de evaluación de proyectos de reprocesamiento de relaves.

Desde una perspectiva ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque cradle-to-gate permitió identificar los principales puntos de consumo energético y generación de impactos asociados al proceso propuesto, destacando especialmente las etapas de lixiviación y purificación como las más intensivas en recursos. No obstante, al tratarse de una fuente secundaria, el reprocesamiento de relaves presenta ventajas ambientales relevantes frente a la minería primaria, tales como la reducción del volumen de pasivos ambientales, la reutilización de material previamente extraído y la disminución de impactos asociados a nuevas faenas mineras. Estos resultados posicionan al proyecto como una alternativa alineada con los principios de economía circular y gestión sustentable de residuos mineros.

En términos estratégicos, los resultados obtenidos confirman que Chile posee condiciones geológicas, técnicas y regulatorias favorables para avanzar en la valorización de relaves como fuente de minerales críticos. La recuperación de tierras raras desde relaves férrico-apatíticos representa una oportunidad concreta para diversificar la matriz productiva minera, reducir la dependencia de la minería primaria y fortalecer la inserción del país en la cadena de valor de los REE, en un contexto global marcado por la transición energética y la creciente demanda por estos elementos.

Finalmente, se concluye que la producción de carbonatos mixtos de tierras raras (MREC) a partir de relaves férrico-apatíticos es técnicamente viable y potencialmente rentable bajo condiciones adecuadas de selección de depósitos, diseño de proceso y control de variables críticas. No obstante, para avanzar hacia etapas de ingeniería de mayor detalle, se recomienda profundizar en estudios a escala piloto, optimización de balances de masa y energía, refinamiento del modelo de costos operacionales por etapas y análisis de mercado de largo plazo. En este sentido, el presente trabajo constituye una base técnica sólida para futuras investigaciones y para el desarrollo de proyectos industriales orientados a una minería de tierras raras más sustentable en Chile.

BIBLIOGRAFIA

Avendaño Corvalán, P. J. (2017). Evaluación de factibilidad técnico-ambiental de una planta de extracción de tierras raras en Chile (Memoria de título). Universidad de Chile.

Avendaño, R. (2017). Evaluación técnico-ambiental de procesos hidrometalúrgicos aplicados a relaves mineros con contenido de tierras raras (Memoria de título). Universidad de Chile.

Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>

Blasse, G., & Grabmaier, B. C. (1994). *Luminescent materials*. Springer.

Borst, A. M., Smith, M. P., Finch, A. A., Estrade, G., Villanova-de-Benavent, C., Nason, P., & Geraki, K. (2020). Adsorption of rare earth elements in regolith-hosted clay deposits. *Nature Communications*, 11, 4386. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18190-5>

Cacciuttolo, C., Basualto, S., & Araya, A. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings: A critical review. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>

Castor, S. B., & Hedrick, J. B. (2006). Rare earth elements. In *Industrial minerals and rocks* (7th ed.). SME.

Castro, A., & Sánchez, M. (2019). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción. *Revista de Ingeniería y Construcción*, 34(2), 115–129.

Chakhmouradian, A. R., & Wall, F. (2012). Rare earth elements: Minerals, mines, magnets (and more). *Elements*, 8(5), 333–340. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.333>

Chakhmouradian, A. R., & Zaitsev, A. N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks: Sources and processes. *Elements*, 8(5), 347–353.

Coey, J. M. D. (2010). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press.

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2021). Análisis de minerales críticos y/o estratégicos. COCHILCO.

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2022). Minerales críticos para la transición energética. COCHILCO.

Cunningham, L. D., Walters, A., & Jones, P. T. (2025). The rare earth circular economy: Techno-economic and strategic assessment of recycling pathways.

Resources, Conservation and Recycling, 210, 106239.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.106239>

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). An introduction to the rock-forming minerals (2nd ed.). Longman.

European Commission. (2023). Critical Raw Materials Act. European Union.

Filippov, L. O., Filippova, I. V., & Severov, V. V. (2019). Spodumene flotation mechanism. *Minerals*, 9(6), 372. <https://doi.org/10.3390/min9060372>

Fock, G., & Kunstmann, A. (2023). Exploración y evaluación de recursos de tierras raras en arcillas iónicas del centro-sur de Chile (Tesis de magíster). Universidad de Chile.

Gerasimovsky, V. I. (1966). Rare earth elements in apatite deposits of the Khibiny massif. *Geochemistry International*, 3(4), 567–582.

Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2016). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 25(3), 285–306. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9300-6>

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). Chemistry of the elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). Extractive metallurgy of rare earths (2nd ed.). CRC Press.

Habashi, F. (1997). Textbook of hydrometallurgy. Métaux Spéciaux.

Han, S., De Koning, A., & Pauliuk, S. (2023). Global supply sustainability assessment of critical metals for clean energy technology. *Resources Policy*, 85, 103994. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103994>

International Energy Agency. (2023). The role of critical minerals in clean energy transitions. IEA.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Critical materials for the energy transition. IRENA.

Jensen, J., & Mackintosh, A. R. (1991). Rare earth magnetism: Structures and excitations. Clarendon Press.

Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>

Khomyakov, A. P. (1995). Mineralogy of hyperagpaitic alkaline rocks. Oxford University Press.

Lottermoser, B. (2010). Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts (3rd ed.). Springer.

- Marcus, Y. (1997). Ion exchange and solvent extraction of metal complexes. In J. A. Marinsky & Y. Marcus (Eds.), *Ion exchange and solvent extraction* (Vol. 12, pp. 1–48). Marcel Dekker.
- Mariano, A. N. (1989). Economic geology of rare earth minerals. *Reviews in Mineralogy*, 21, 309–348.
- Pradip, & Fuerstenau, D. W. (1991). Design and development of flotation reagents for beneficiation of rare earth minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 32(1–2), 1–22. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(91\)90018-K](https://doi.org/10.1016/0301-7516(91)90018-K)
- Rydberg, J. (1969). Solvent extraction of rare earths. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 3(5), 763–783.
- Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). Characteristics and genesis of ion-adsorption-type rare earth element deposits. *Ore Geology Reviews*, 79, 1–19.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2015). *Guía metodológica para la evaluación de riesgos en instalaciones mineras*. SERNAGEOMIN.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2022). *Catastro nacional de depósitos de relaves* (Edición 2022). SERNAGEOMIN.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). *Catastro nacional de depósitos de relaves en Chile*. SERNAGEOMIN.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2025). *Base de datos geoquímica de depósitos de relaves – Actualización 2025*. SERNAGEOMIN.
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5), 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press.
- Svoboda, J. (2004). *Magnetic techniques for the treatment of materials*. Springer.
- United States Geological Survey (USGS). (2024). *Mineral commodity summaries 2024: Rare earths*. U.S. Geological Survey.
- United States Geological Survey (USGS). (2025). *Mineral commodity summaries 2025: Rare earths*. U.S. Geological Survey.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Yen, W. M., & Weber, M. J. (2004). *Inorganic phosphors: Compositions, preparation and optical properties*. CRC Press.

ANEXOS

Código usado para el cálculo de VAN caso base inicial

```
import numpy as np

# 1. FUNCIÓN PARA CALCULAR VAN
# =====

def npv(cash_flows, rate):
    """
    Calcula el Valor Actual Neto (VAN) dado un vector de flujos
    y una tasa de descuento anual.
    """
    years = np.arange(1, len(cash_flows) + 1)
    discount_factors = 1 / (1 + rate) ** years
    return np.sum(cash_flows * discount_factors)

# =====
# 2. PARÁMETROS FIJOS DEL PROYECTO
# (EDITA ESTOS VALORES)
# =====

r = 0.08 # tasa de descuento (8%)
TAX = 0.27 # impuesto (27%)

# Parámetros de ingeniería / operación (fijos)
TON_ANUAL = 2.5e6 # t/año de relave procesado
TREO_PPM = 450 # ley fija de TREO en ppm
RECOVERY = 0.75 # recuperación global (fracción)
PRICE_MREC = 45.0 # precio MREC (USD/kg) fijo
OPEX_UNIT = 30.0 # OPEX unitario (USD/t relave)
CAPEX = 250e6 # CAPEX inicial (USD)

# Parámetros de recurso
T_total_cluster = 60e6 # toneladas totales de relaves en el clúster
MAX_YEARS = 30 # vida económica máxima

# =====
# 3. CÁLCULO DE VIDA ÚTIL Y PRODUCCIÓN
# =====

# Vida geológica (años) según tonelaje del clúster
vida_geologica = T_total_cluster / TON_ANUAL

# Vida efectiva acotada por MAX_YEARS
vida_efectiva = int(min(vida_geologica, MAX_YEARS))

print(f"Vida geológica : {vida_geologica:.2f} años")
print(f"Vida efectiva usada : {vida_efectiva:d} años")

# Producción anual de MREC (t/año)
# TREO_PPM → fracción: ppm * 1e-6
ton_ree_anual = TON_ANUAL * TREO_PPM * RECOVERY * 1e-6 # t/año de MREC

print(f"Producción anual MREC: {ton_ree_anual:.2f} t/año")

# OPEX anual (USD/año)
opex_anual = TON_ANUAL * OPEX_UNIT
print(f"OPEX anual : {opex_anual/1e6:.2f} MUSD/año")
```

```
# =====
# 4. FLUJOS DE CAJA ANUALES (DETERMINÍSTICOS)
# =====

cash_flows = np.zeros(vida_efectiva)

for t in range(vida_efectiva):
    # Ingreso anual por venta de MREC
    # ton_ree_anual [t/año] * 1000 [kg/t] * PRICE_MREC [USD/kg]
    revenue_t = ton_ree_anual * 1000.0 * PRICE_MREC

    # Flujo antes de impuestos
    fc_before_tax_t = revenue_t - opex_anual

    # Impuesto solo si hay utilidad positiva
    if fc_before_tax_t > 0:
        fc_after_tax_t = fc_before_tax_t * (1 - TAX)
    else:
        fc_after_tax_t = fc_before_tax_t

    cash_flows[t] = fc_after_tax_t

# =====
# 5. VAN OPERACIONAL Y VAN TOTAL
# =====

npv_ops = npv(cash_flows, r)    # VAN de los flujos operacionales
npv_total = npv_ops - CAPEX    # VAN del proyecto (considerando inversión inicial)

print("\n=== RESULTADOS DETERMINÍSTICOS ===")
print(f"VAN operacional (sin CAPEX): {npv_ops/1e6:,.2f} MUSD")
print(f"VAN total (con CAPEX) : {npv_total/1e6:,.2f} MUSD")
```

Código usado para el cálculo de VAN para los escenarios de calculo de opex por etapas y el escenario base en simulación Monte Carlo

```
# =====
# COMPARACIÓN A vs B – MONTE CARLO (Coquimbo → MREC)
# A) Original: OPEX triangular (25–30–45) USD/t relave, revenue por TREOeq
# B) Flowsheet por etapas: LIMS → Clasif/Deslamado → WHIMS±Flot → Lix H2SO4
# → Purificación Ca/Fe → SX/IX → Precipitación+Filtrado/Secado
# OPEX calculado desde consumos por etapa + factor overhead realista
# Revenue por MREC (pero precio ajustado para no inflar ingresos):
# P_MREC = f_TREO_MREC * P_TREOeq (consistente con canasta en óxidos)
# Archivos requeridos: TREO_ppm.csv, Relaves_coquimbo.xlsx
# Exporta: comparacion_A_vs_B_mrec_realista.xlsx
# =====

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as st

# =====
# 0) TREO: carga + KDE truncada (igual a tu base)
# =====
df_treo = pd.read_csv("TREO_ppm.csv", decimal=',')
treo_data = df_treo["TREO_ppm"].dropna().values.astype(float)
```

```
n_muestras = len(treo_data)
mean_treo = np.mean(treo_data)
std_treo = np.std(treo_data)
min_treo = np.min(treo_data)
max_treo = np.max(treo_data)
median_treo = np.median(treo_data)

print("=== Estadísticos TREO (ppm) ===")
print("N muestras      :", n_muestras)
print("Promedio (ppm)   :", mean_treo)
print("Desv std (ppm)    :", std_treo)
print("Mínimo (ppm)      :", min_treo)
print("Máximo (ppm)      :", max_treo)
print("Mediana (ppm)     :", median_treo)

# Lognormal solo como referencia
shape, loc_logn, scale = st.lognorm.fit(treo_data, floc=0)
print("\n=== Ajuste lognormal TREO (loc=0) ===")
print("shape =", shape)
print("loc   =", loc_logn)
print("scale =", scale)

def sample_kde_truncated(kde, n_samples, low, high):
    """Muestra desde KDE, aceptando solo valores en [low, high]."""
    samples = np.empty(n_samples)
    filled = 0
    while filled < n_samples:
        batch = kde.resample(n_samples).flatten()
        valid = batch[(batch >= low) & (batch <= high)]
        if valid.size > 0:
            take = min(valid.size, n_samples - filled)
            samples[filled:filled+take] = valid[:take]
            filled += take
    return samples

kde_treo = st.gaussian_kde(treo_data)

# Relaves Coquimbo (para registro)
df_relaves = pd.read_excel("Relaves_coquimbo.xlsx")
df_relaves["Tonelaje_total_t"] = pd.to_numeric(df_relaves["Tonelaje_total_t"], errors="coerce")
T_total_coq = df_relaves["Tonelaje_total_t"].dropna().values.sum()
print(f"\nTonelaje total Coquimbo (t): {T_total_coq:.0f}")

# =====
# 1) PARÁMETROS DEL PROYECTO
# =====
N_SIM = 10000
r = 0.08
TAX = 0.27

TON_MIN = 2.0e6
TON_MODE = 3.5e6
TON_MAX = 4.5e6

MAX_YEARS = 30

REC_MIN = 0.65
REC_MODE = 0.70
REC_MAX = 0.80

# A: OPEX agregado
```

```
OPEX_MIN = 25
OPEX_MODE = 30
OPEX_MAX = 45

CAPEX_MIN = 150e6
CAPEX_MODE = 250e6
CAPEX_MAX = 280e6

T_total_cluster = 80e6 # 80 Mt

TREO_MIN = 300
TREO_MAX = 950
treo_sim = sample_kde_truncated(kde_treo, N_SIM, TREO_MIN, TREO_MAX)
print("\nTREO sim truncado: min =", treo_sim.min(), "max =", treo_sim.max())

# =====
# 2) PRECIOS: mean reversion canasta (óxidos)
# Interpretación: P_basket ~ USD/kg TREOeq (equivalente)
# =====
elements = ["La2O3", "CeO2", "Pr6O11", "Nd2O3"]
mu = np.array([6.2, 6.5, 145.0, 145.0]) # placeholders
phi = np.array([0.85, 0.85, 0.70, 0.70])
sigma = np.array([2.0, 2.0, 35.0, 30.0])
P0 = mu.copy()

w = np.array([0.25, 0.35, 0.12, 0.28])
assert np.isclose(w.sum(), 1.0)

def simulate_mean_reverting_prices(mu, phi, sigma, P0, T, N_ITER, seed=None):
    if seed is not None:
        np.random.seed(seed)
    n_elem = len(mu)
    prices = np.zeros((N_ITER, T, n_elem))
    prices[:, 0, :] = P0
    for i in range(N_ITER):
        for t in range(1, T):
            eps = np.random.normal(size=n_elem)
            prices[i, t, :] = mu + phi * (prices[i, t-1, :] - mu) + sigma * eps
            prices[i, t, :] = np.maximum(prices[i, t, :], 0.01)
    return prices

prices_paths = simulate_mean_reverting_prices(mu, phi, sigma, P0, MAX_YEARS, N_SIM)
P_basket = np.tensordot(prices_paths, w, axes=([2], [0])) # (N_SIM, MAX_YEARS)

# =====
# 3) NPV
# =====
def npv(cash_flows, rate):
    years = np.arange(1, len(cash_flows) + 1)
    return np.sum(cash_flows / (1 + rate) ** years)

# =====
# 4) ESCENARIO B: OPEX por etapas (valores realistas)
# Ajuste clave:
# - consumos directos por etapa (triangular)
# - + factor overhead para capturar mano de obra, mantención, reactivos SX/IX,
#   servicios, administración, etc.
# =====

# Costos unitarios (USD)
c_elec = 0.12 # USD/kWh
c_water = 1.00 # USD/m3 make-up neto (con recirculación)
```

c_acid = 0.18 # USD/kg H₂SO₄
 c_lime = 0.10 # USD/kg cal
 c_floc = 3.00 # USD/kg floc
 c_effluent = 0.50 # USD/m³ tratamiento purga

Factor de costos indirectos / no modelados

(mantención, mano de obra, repuestos, orgánico/resinas SX/IX, servicios, G&A)

OPEX_OVERHEAD_FACTOR = 1.55 # 1.45–1.70 típico scoping/PEA; usamos 1.55 como base realista

Etapas: TRIANGULAR (min, mode, max) por t relave

Objetivo: OPEX directo ~ 14–18 USD/t relave → con overhead ~ 22–28 USD/t relave (P50)

stages_tri = {

1) LIMS

"LIMS": {

"kWh": (0.6, 0.9, 1.4),
 "water_m3": (0.01, 0.03, 0.06),
 "floc_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "effluent_m3": (0.00, 0.00, 0.00),

},

2) Clasificación / deslamado

"Clasificacion_Deslamado": {

"kWh": (0.4, 0.7, 1.2),
 "water_m3": (0.10, 0.18, 0.35),
 "floc_kg": (0.008, 0.015, 0.030), # 8–30 g/t
 "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "effluent_m3": (0.01, 0.03, 0.08),

},

3) WHIMS ± flotación apatita (rango captura optionalidad)

"WHIMS_Flotacion_Apatita": {

"kWh": (1.2, 2.0, 3.2),
 "water_m3": (0.03, 0.08, 0.20),
 "floc_kg": (0.000, 0.005, 0.015),
 "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "effluent_m3": (0.00, 0.01, 0.03),

},

4) Lixiviación H₂SO₄ (driver principal)

"Lixiviacion_H2SO4": {

"kWh": (3.0, 4.5, 6.5),
 "water_m3": (0.20, 0.35, 0.60),
 "acid_kg": (12.0, 18.0, 28.0), # más realista para matriz Ca/Fe/apatita
 "floc_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "effluent_m3": (0.00, 0.00, 0.00),

},

5) Purificación Ca/Fe (neutralización + clarificación + bleed)

"Purificacion_CaFe": {

"kWh": (1.0, 1.8, 3.0),
 "water_m3": (0.03, 0.08, 0.18),
 "lime_kg": (6.0, 10.0, 16.0),
 "floc_kg": (0.010, 0.020, 0.040),
 "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
 "effluent_m3": (0.05, 0.10, 0.20),

},

6) SX/IX (sin reposición explícita de orgánicos/resinas: lo captura overhead)

"SX_IX": {

"kWh": (1.5, 2.5, 4.0),
 "water_m3": (0.02, 0.06, 0.15),
 "floc_kg": (0.00, 0.00, 0.00),

```

    "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
    "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
    "effluent_m3":(0.03, 0.06, 0.12),
},
# 7) Precipitación MREC + filtrado/secado (energía + pequeñas purgas)
"Precipitacion_MREC_Filtrado_Secado": {
    "kWh": (2.5, 3.5, 5.5),
    "water_m3": (0.01, 0.03, 0.10),
    "floc_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
    "acid_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
    "lime_kg": (0.00, 0.00, 0.00),
    "effluent_m3":(0.01, 0.03, 0.08),
},
}

def sample_stage_consumptions(stages_tri_dict, rng):
    sampled = {}
    for stage, ins in stages_tri_dict.items():
        sampled[stage] = {}
        for k, (lo, mode, hi) in ins.items():
            sampled[stage][k] = float(mode) if (lo == mode == hi) else float(rng.triangular(lo, mode, hi))
    return sampled

def opex_from_sampled_stages(sampled_stages):
    """Retorna: opex_directo_USD/t_relave, totals_consumos_por_t_relave, breakdown_df"""
    totals = {"kWh":0.0, "water_m3":0.0, "acid_kg":0.0, "lime_kg":0.0, "floc_kg":0.0, "effluent_m3":0.0}
    rows = []
    opex_direct = 0.0

    for stage, s in sampled_stages.items():
        kWh = s.get("kWh", 0.0)
        wtr = s.get("water_m3", 0.0)
        acid = s.get("acid_kg", 0.0)
        lime = s.get("lime_kg", 0.0)
        floc = s.get("floc_kg", 0.0)
        eff = s.get("effluent_m3", 0.0)

        cost = (kWh*c_elec + wtr*c_water + acid*c_acid + lime*c_lime + floc*c_floc + eff*c_effluent)
        opex_direct += cost

        totals["kWh"] += kWh
        totals["water_m3"] += wtr
        totals["acid_kg"] += acid
        totals["lime_kg"] += lime
        totals["floc_kg"] += floc
        totals["effluent_m3"] += eff

        rows.append({
            "etapa": stage,
            "kWh/t_relave": kWh,
            "agua_m3/t_relave": wtr,
            "acido_kg/t_relave": acid,
            "cal_kg/t_relave": lime,
            "floc_kg/t_relave": floc,
            "efluente_m3/t_relave": eff,
            "OPEX_directo_USD/t_relave": cost
        })

    breakdown_df = pd.DataFrame(rows)
    return opex_direct, totals, breakdown_df

# =====

```

```
# 5) SIMULACIÓN A vs B (misma TREO, throughput, recovery, CAPEX, precios)
# =====
rng = np.random.default_rng(123)

ton_anual = np.random.triangular(TON_MIN, TON_MODE, TON_MAX, size=N_SIM)
recovery = np.random.triangular(REC_MIN, REC_MODE, REC_MAX, size=N_SIM)
opex_t_A = np.random.triangular(OPEX_MIN, OPEX_MODE, OPEX_MAX, size=N_SIM)
capex = np.random.triangular(CAPEX_MIN, CAPEX_MODE, CAPEX_MAX, size=N_SIM)

# Producto
f_TREO_MREC = 0.50

rows_A, rows_B = [], []
npvs_A = np.zeros(N_SIM)
npvs_B = np.zeros(N_SIM)

breakdown_example_B = None # guarda un ejemplo para export

for i in range(N_SIM):
    vida_geologica = T_total_cluster / ton_anual[i]
    vida_efectiva = min(vida_geologica, MAX_YEARS)
    n_years = int(vida_efectiva)

    treo_ppm_val = treo_sim[i]

    # Producción TREO (t/año)
    ton_treo = ton_anual[i] * treo_ppm_val * recovery[i] * 1e-6

    # -----
    # ESCENARIO A (original)
    # -----
    opex_anual_A = ton_anual[i] * opex_t_A[i]

    cash_A = np.zeros(n_years)
    rev_A = np.zeros(n_years)

    for t in range(n_years):
        price_year_treo_eq = P_basket[i, t] # USD/kg TREOeq
        revenue_t = ton_treo * 1000 * price_year_treo_eq
        rev_A[t] = revenue_t

        fc_bt = revenue_t - opex_anual_A
        cash_A[t] = fc_bt*(1 - TAX) if fc_bt > 0 else fc_bt

    npv_ops_A = npv(cash_A, r)
    npvs_A[i] = npv_ops_A - capex[i]

    rows_A.append({
        "sim_id": i,
        "ton_anual_t": ton_anual[i],
        "treo_ppm": treo_ppm_val,
        "recovery_frac": recovery[i],
        "price_treo_eq_usd_kg": P_basket[i, :n_years].mean(),
        "opex_unit_usd_t_relave": opex_t_A[i],
        "capex_usd": capex[i],
        "vida_efectiva_years": vida_efectiva,
        "ton_treo_t_year": ton_treo,
        "revenue_usd_year": rev_A.mean(),
        "opex_usd_year": opex_anual_A,
        "npv_total_usd": npvs_A[i],
    })
```

```
# -----
# ESCENARIO B (etapas + MREC)
# -----
ton_mrec = ton_treo / f_TREO_MREC # t MREC/año

sampled = sample_stage_consumptions(stages_tri, rng)
opex_direct_B, totals_B, breakdown_B = opex_from_sampled_stages(sampled)

# OPEX total con overhead realista
opex_unit_B = opex_direct_B * OPEX_OVERHEAD_FACTOR
opex_anual_B = ton_anual[i] * opex_unit_B

if breakdown_example_B is None:
    # guardamos un ejemplo con columna de OPEX total por etapa (aplicando overhead proporcional)
    breakdown_example_B = breakdown_B.copy()
    breakdown_example_B["OPEX_total_USD/t_relave"] =
breakdown_example_B["OPEX_directo_USD/t_relave"] * OPEX_OVERHEAD_FACTOR

cash_B = np.zeros(n_years)
rev_B = np.zeros(n_years)

for t in range(n_years):
    # Consistencia precio-producto:
    # P_basket ~ USD/kg TREOeq (por canasta en óxidos)
    # Entonces precio del MREC ~ f_TREO * P_TREOeq
    price_year_treo_eq = P_basket[i, t]
    price_year_mrec = f_TREO_MREC * price_year_treo_eq # USD/kg MREC

    revenue_t = ton_mrec * 1000 * price_year_mrec
    # (equivalente a ton_treo * 1000 * price_year_treo_eq)
    rev_B[t] = revenue_t

    fc_bt = revenue_t - opex_anual_B
    cash_B[t] = fc_bt*(1 - TAX) if fc_bt > 0 else fc_bt

npv_ops_B = npv(cash_B, r)
npvs_B[i] = npv_ops_B - capex[i]

rows_B.append({
    "sim_id": i,
    "ton_anual_t": ton_anual[i],
    "treo_ppm": treo_ppm_val,
    "recovery_frac": recovery[i],
    "price_mrec_usd_kg": (f_TREO_MREC * P_basket[i, :n_years]).mean(),
    "opex_unit_direct_usd_t_relave": opex_direct_B,
    "opex_overhead_factor": OPEX_OVERHEAD_FACTOR,
    "opex_unit_total_usd_t_relave": opex_unit_B,
    "capex_usd": capex[i],
    "vida_efectiva_years": vida_efectiva,
    "ton_treo_t_year": ton_treo,
    "ton_mrec_t_year": ton_mrec,
    "revenue_usd_year": rev_B.mean(),
    "opex_usd_year": opex_anual_B,
    # consumos por t relave (trazabilidad ACV)
    "kWh_per_t_relave": totals_B["kWh"],
    "water_m3_per_t_relave": totals_B["water_m3"],
    "acid_kg_per_t_relave": totals_B["acid_kg"],
    "lime_kg_per_t_relave": totals_B["lime_kg"],
    "floc_kg_per_t_relave": totals_B["floc_kg"],
    "effluent_m3_per_t_relave": totals_B["effluent_m3"],
    "npv_total_usd": npvs_B[i],
})
```

```

df_A = pd.DataFrame(rows_A)
df_B = pd.DataFrame(rows_B)

# =====
# 6) Resumen + verificación rápida
# =====
def summarize_npvs(npvs):
    return {
        "VAN_mean_MUSD": np.mean(npvs)/1e6,
        "VAN_P10_MUSD": np.percentile(npvs,10)/1e6,
        "VAN_P50_MUSD": np.percentile(npvs,50)/1e6,
        "VAN_P90_MUSD": np.percentile(npvs,90)/1e6,
        "Prob_VAN_pos_%": 100*np.mean(npvs>0),
    }

sum_A = summarize_npvs(npvs_A)
sum_B = summarize_npvs(npvs_B)

df_comp = pd.DataFrame([
    {"Escenario": "A_original (OPEX triangular; revenue TREOeq)", **sum_A},
    {"Escenario": "B_etapas_realista (OPEX por etapas+overhead; revenue MREC)", **sum_B},
])

print("\n=== COMPARACIÓN A vs B (REALISTA) ===")
print(df_comp)

print("\nChequeo promedios:")
print("OPEX_unit A mean (USD/t relave):", df_A["opex_unit_usd_t_relave"].mean())
print("OPEX_unit B mean DIRECT (USD/t relave):", df_B["opex_unit_direct_usd_t_relave"].mean())
print("OPEX_unit B mean TOTAL (USD/t relave):", df_B["opex_unit_total_usd_t_relave"].mean())
print("Revenue A mean (USD/año):", df_A["revenue_usd_year"].mean())
print("Revenue B mean (USD/año):", df_B["revenue_usd_year"].mean())

# =====
# 7) Tornado Spearman (A y B)
# =====
vars_A = [
    "ton_anual_t", "treo_ppm", "recovery_frac", "price_treo_eq_usd_kg", "opex_unit_usd_t_relave", "capex_usd",
    "vida_efectiva_years"]
corr_A = df_A[vars_A+["npv_total_usd"]].corr(method="spearman")["npv_total_usd"].drop("npv_total_usd")
corr_A = corr_A.reindex(corr_A.abs().sort_values().index)
df_tornado_A = pd.DataFrame({"Variable": corr_A.index, "Coef_Spearman": corr_A.values})

vars_B = [
    "ton_anual_t", "treo_ppm", "recovery_frac", "price_mrec_usd_kg",
    "opex_unit_total_usd_t_relave", "capex_usd", "vida_efectiva_years",
    "acid_kg_per_t_relave", "kWh_per_t_relave", "water_m3_per_t_relave", "lime_kg_per_t_relave", "effluent_m3_per_t_relave"]
corr_B = df_B[vars_B+["npv_total_usd"]].corr(method="spearman")["npv_total_usd"].drop("npv_total_usd")
corr_B = corr_B.reindex(corr_B.abs().sort_values().index)
df_tornado_B = pd.DataFrame({"Variable": corr_B.index, "Coef_Spearman": corr_B.values})

# =====
# 8) Export Excel
# =====
summary_dict = {
    "N_muestras_TREO": n_muestras,
    "Promedio_TREO_ppm": mean_treo,
    "Desv_std_TREO_ppm": std_treo,

```

```

"Min_TREO_ppm": min_treo,
"Max_TREO_ppm": max_treo,
"Mediana_TREO_ppm": median_treo,
"lognorm_shape": shape,
"lognorm_loc": loc_logn,
"lognorm_scale": scale,
"Tonelaje_total_Coq_t": T_total_coq,
"Tonelaje_total_cluster_t": T_total_cluster,
"OPEX_OVERHEAD_FACTOR": OPEX_OVERHEAD_FACTOR,
"OPEX_A_mean_USD_t": float(df_A["opex_unit_usd_t_relave"].mean()),
"OPEX_B_direct_mean_USD_t": float(df_B["opex_unit_direct_usd_t_relave"].mean()),
"OPEX_B_total_mean_USD_t": float(df_B["opex_unit_total_usd_t_relave"].mean()),
}
df_summary = pd.DataFrame([summary_dict])

with pd.ExcelWriter("comparacion_A_vs_B_mrec_realista.xlsx", engine="openpyxl", mode="w") as writer:
    df_A.to_excel(writer, sheet_name="A_original", index=False)
    df_B.to_excel(writer, sheet_name="B_etapas_realista", index=False)
    df_comp.to_excel(writer, sheet_name="comparacion", index=False)
    df_summary.to_excel(writer, sheet_name="resumen_inputs", index=False)
    df_tornado_A.to_excel(writer, sheet_name="tornado_A", index=False)
    df_tornado_B.to_excel(writer, sheet_name="tornado_B", index=False)
    breakdown_example_B.to_excel(writer, sheet_name="breakdown_B_ejemplo", index=False)

print("\n✅ Exportado: 'comparacion_A_vs_B_mrec_realista.xlsx'")

# =====
# 9) Gráficos: VAN y comparación
# =====
plt.figure(figsize=(8,5))
plt.hist(npvs_A/1e6, bins=50, alpha=0.6, label="A: original")
plt.hist(npvs_B/1e6, bins=50, alpha=0.6, label="B: etapas realista")
plt.xlabel("VAN (MUSD)")
plt.ylabel("Frecuencia")
plt.title("Comparación distribución VAN – Escenario A vs B (realista)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# Curvas de riesgo (CDF)
npvs_A_sorted = np.sort(npvs_A/1e6)
npvs_B_sorted = np.sort(npvs_B/1e6)
p = np.linspace(0, 1, N_SIM, endpoint=False)

plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(npvs_A_sorted, p, label="A: P(VAN ≤ x)")
plt.plot(npvs_B_sorted, p, label="B: P(VAN ≤ x)")
plt.axvline(0, color="red", linestyle="--", label="VAN = 0")
plt.xlabel("VAN (MUSD)")
plt.ylabel("Probabilidad acumulada")
plt.title("Curva de riesgo – A vs B (realista)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```