



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

Análisis de la metodología brasileña de descaracterización aplicada en depósitos de relaves en abandono en el contexto chileno

Memoria de Título presentada por

Florencia Henríquez Pimentel

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gonzalo Suazo Fuentealba

FEBRERO, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de la metodología brasileña de descaracterización aplicada en depósitos de relaves en abandono en el contexto chileno

Nombre del candidato(a): Florencia Henríquez Pimentel

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gonzalo Suazo Fuentealba, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: miércoles 08 de abril, 2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: miércoles 08 de abril, 2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Índice

Índice general	1
Lista de tablas	3
Lista de figuras	4
1. Introducción	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Depósitos de relaves: definición, riesgos y fundamentos geotécnicos	5
2.1.1. Métodos de construcción de depósitos de relaves	5
2.1.2. Vulnerabilidad del método aguas arriba	6
2.2. Clasificación y estados de los depósitos según SERNAGEOMIN	6
2.2.1. Tipos de instalaciones de relaves	6
2.2.2. Estados operacionales de los depósitos	7
2.3. El contexto chileno: relaves abandonados y vacío normativo	7
2.4. Desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019) y giro global en la gestión de relaves	8
2.5. La metodología brasileña de descaracterización	9
2.6. Gobernanza institucional y evolución del proceso en Brasil	9
2.7. Referentes internacionales en gestión de relaves	10
2.8. Clasificación de estimaciones de costos según AACE	11
2.9. Dimensiones de análisis para la aplicabilidad en Chile	11
3. Objetivos	13
3.1. Objetivo General	13
3.2. Objetivos Específicos	13
4. Marco Metodológico	14
4.1. Diseño general de la investigación	14
4.2. Selección y caracterización de casos brasileños	14

4.3.	Selección de casos en Chile	15
4.4.	Metodología de estimación de costos	15
4.4.1.	Consideraciones para casos con información incompleta	15
4.4.2.	Metodología de estandarización y ajuste de costos para los casos brasileños	16
4.4.3.	Metodología de obtención de costos para los casos chilenos	18
4.5.	Evaluación ambiental y social	21
4.6.	Análisis comparativo y síntesis integradora	21
5.	Presentación de Resultados	22
5.1.	Análisis comparativo normativo y benchmarking internacional	22
5.2.	Alineamiento con el estándar GISTM (ICMM–UNEP–PRI, 2020)	23
5.3.	Resultados técnicos y económicos de los casos brasileños	23
5.3.1.	Caso brasileño 1: Barragem B1 – Itaminas Mineração S.A. (Sarzedo/MG)	23
5.3.2.	Caso 2: Barragem de Arêdes (SAFM Mineração)	25
5.3.3.	Caso 3: Barragem dos Alemães – Gerdau Açominas S.A. (Ouro Preto/MG)	28
5.3.4.	Caso brasileiro 4: Barragem do Vigia – CSN Mineração S.A. (Ouro Preto/MG)	30
5.3.5.	Caso brasileño 5: Barragem Central – SAFM Mineração Ltda. (Itabirito/MG)	32
5.3.6.	Resumen casos estudiados de Brasil	34
5.4.	Resultados ambientales y sociales de los casos brasileños	35
5.4.1.	Caso brasileño 1: Barragem B1 – Itaminas Mineração S.A. (Sarzedo/MG)	35
5.4.2.	Caso 2: Barragem de Arêdes (SAFM Mineração)	36
5.4.3.	Caso 3: Barragem dos Alemães – Gerdau Açominas S.A. (Ouro Preto/MG)	37
5.4.4.	Caso brasileiro 4: Barragem do Vigia – CSN Mineração S.A. (Ouro Preto/MG)	39
5.4.5.	Caso brasileño 5: Barragem Central – SAFM Mineração Ltda. (Itabirito/MG)	40
5.5.	Resultados de los casos chilenos	41
5.5.1.	Depósito Flora 1 (Andacollo)	41
5.5.2.	Caso chileno: Depósito Cerro Negro 4 (Cabildo)	47
5.5.3.	Caso chileno: Depósito Ojancos 1 (Copiapó)	52
5.6.	Resultados ambientales	58

5.7. Resultados sociales	60
6. Análisis y discusión de resultados	62
6.1. Coherencia de los resultados con los objetivos de la investigación	62
6.2. Discusión normativa y de gobernanza	63
6.2.1. Brasil como modelo correctivo de alta exigencia	63
6.2.2. Canadá y Australia como referentes preventivos	63
6.2.3. Implicancias para Chile	63
6.3. Análisis comparativo de los casos brasileños	64
6.4. Discusión técnica: viabilidad económica y operativa	66
6.4.1. Comparación de condiciones geotécnicas y climáticas	66
6.4.2. Análisis de resultados de casos en Chile	68
6.4.3. Sensibilidad y priorización de inversiones	71
6.5. Discusión integrada de los resultados ambientales y sociales	71
6.6. Limitaciones del estudio	72
6.7. Limitaciones del proceso de extrapolación de costos	72
6.8. Implicancias para la política pública y la gestión de relaves en Chile	74
7. Conclusiones	75
8. Referencias bibliográficas	77

Índice de tablas

1. Valores CEPCI y factores de ajuste utilizados.	16
2. Tipo de cambio promedio anual BRL/USD (referencial).	17
3. Rendimientos horarios referenciales utilizados en las estimaciones.	19
4. Costos unitarios referenciales por Hora Máquina (HM).	19
5. Costos unitarios referenciales por Hora Hombre (HH).	19
6. Benchmarking internacional de descaracterización y cierre de depósitos de relaves. . .	22
7. Alineamiento de los marcos regulatorios nacionales con los principios GISTM.	23

8.	Costos de descaracterización por categoría para la Barragem B1 – Itaminas.	25
9.	Costos de descaracterización por categoría para la Barragem Arêdes.	27
10.	Costos de descaracterización por categoría para la Barragem dos Alemães.	29
11.	Costos de descaracterización por categoría para la Barragem do Vigia.	31
12.	Costos de descaracterización por categoría para la Barragem Central.	33
13.	Depósitos brasileños completamente descaracterizados analizados en este estudio. . .	34
14.	Promedio de costos unitarios por categoría.	35
15.	Ficha técnica del depósito Flora 1 (Andacollo).	42
16.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración <i>in situ</i> , depósito Flora 1.	44
17.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 2: Remoción total y disposición externa, depósito Flora 1.	46
18.	Ficha técnica del depósito Cerro Negro 4 (Cabildo).	47
19.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración <i>in situ</i> , depósito Cerro Negro 4.	50
20.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 2: Remoción completa y redistribución interna, depósito Cerro Negro 4.	51
21.	Ficha técnica del depósito Ojancos 1 (Copiapó).	53
22.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración <i>in situ</i> , depósito Ojancos 1.	55
23.	Desglose de costos por categoría – Alternativa 2 (disposición en Planta Manuel Antonio Matta Ruiz), depósito Ojancos 1.	57
24.	Análisis de sensibilidad – Alternativa 2 (disposición en Planta Pucobre), depósito Ojancos 1.	57
25.	Indicadores ambientales observados en Brasil y proyección al contexto chileno.	58
26.	Indicadores sociales observados en Brasil y proyección al contexto chileno.	60
27.	Matriz comparativa técnica de los casos brasileños (síntesis para análisis transversal).	64

Índice de figuras

1.	Distribución porcentual de los costos de descaracterización por categoría de la Barragem B1.	25
----	--	----

2.	Distribución porcentual de costos por categoría para la Barragem Arêdes.	27
3.	Distribución porcentual de costos por categoría para la Barragem dos Alemães. . . .	29
4.	Distribución porcentual de los costos de descaracterización de la Barragem do Vigia por categoría.	31
5.	Distribución porcentual de los costos de descaracterización de la Barragem Central por categoría.	33
6.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración <i>in situ</i>), depósito Flora 1. . .	45
7.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total), depósito Flora 1.	46
8.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración <i>in situ</i>), depósito Cerro Negro 4.	50
9.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total con disposición interna), depósito Cerro Negro 4.	52
10.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración <i>in situ</i>), depósito Ojancos 1.	55
11.	Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total y disposición externa), depósito Ojancos 1.	57
12.	Distribución porcentual de los costos unitarios promedio por categoría.	66
13.	Relación entre el volumen intervenido y el costo unitario de descaracterización para los cinco casos brasileños analizados.	67



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

Análisis de la metodología brasileña de descaracterización aplicada en depósitos de relaves en abandono en el contexto chileno

AUTOR:

Florencia Henríquez Pimentel

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Profesor Guía

Miembro 1 Comisión

Miembro 2 Comisión

(Valparaíso/Santiago), Chile, (FECHA DEFENSA)

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA BRASILEÑA DE DESCARACTERIZACIÓN APLICADA EN DEPÓSITOS DE RELAVES EN ABANDONO EN EL CONTEXTO CHILENO

Floerncia Henríquez Pimentel¹, Gonzalo Suazo Fuentealba¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La presente memoria analiza la aplicabilidad del concepto de descaracterización de depósitos de relaves en Chile, tomando como referencia experiencias implementadas en Brasil en depósitos construidos con el método aguas arriba. El estudio se desarrolla mediante un enfoque aplicado, no experimental y descriptivo-comparativo, integrando dimensiones técnicas, normativas, económicas, ambientales y sociales, con énfasis en depósitos abandonados.

La metodología considera el análisis detallado de ocho casos brasileños de depósitos completamente descaracterizados, a partir de información oficial y documentación técnica disponible. De estos, cinco casos cuentan con antecedentes económicos suficientes, permitiendo la determinación de costos unitarios reales, los cuales se sitúan en rangos del orden de 16–20 USD/m³. Se observa una tendencia decreciente del costo unitario a medida que aumenta el volumen del depósito, asociada a economías de escala. Paralelamente, se analizan los marcos regulatorios de Brasil y Chile, identificando diferencias relevantes en la forma de abordar depósitos inactivos y pasivos mineros.

Sobre la base de estos antecedentes, se evalúan tres depósitos chilenos representativos, ubicados en Andacollo, Cabildo y Copiapó, mediante la estimación de costos para distintas alternativas de descaracterización. Los resultados indican que las alternativas de reconfiguración *in situ* presentan costos unitarios del orden de 2,27–3,57 USD/m³ para el depósito Flora 1, 2,91–3,6 USD/m³ para Cerro Negro 4 y 2,48 USD/m³ para Ojancos 1. En contraste, las alternativas de remoción total con disposición externa muestran una marcada sensibilidad a la distancia de transporte, alcanzando valores de hasta 6,25–6,83 USD/m³ en el caso de Ojancos 1, lo que evidencia el rol dominante de la logística en el costo total del proyecto. Las estimaciones se desarrollan bajo criterios de ingeniería de costos, con niveles de incertidumbre compatibles con estimaciones AACE Clases 4 y 5, y resultan coherentes con órdenes de magnitud observados en planes de cierre aprobados en Chile.

Desde una perspectiva ambiental y social, el análisis evidencia que la descaracterización contribuye a mejorar la estabilidad física e hidráulica de los depósitos, reducir el riesgo residual asociado a relaves abandonados y generar condiciones favorables para la recuperación del territorio y la disminución de la exposición de comunidades cercanas. En conjunto, los resultados permiten concluir que la aplicación del enfoque de descaracterización en Chile es técnica y económicamente viable en determinados contextos, especialmente para alternativas *in situ*, y que su implementación requeriría avanzar hacia una definición normativa explícita, mecanismos de financiamiento adecuados y una gobernanza institucional que integre criterios técnicos, ambientales y sociales.

Abstract

This thesis analyzes the applicability of the concept of tailings dam decharacterization in Chile, using as reference experiences implemented in Brazil in facilities constructed with the upstream method. The study follows an applied, non-experimental, and descriptive-comparative approach, integrating technical, regulatory, economic, environmental, and social dimensions, with emphasis on abandoned tailings deposits.

The methodology includes a detailed analysis of eight Brazilian cases of fully decharacterized tailings dams, based on official information and available technical documentation. Of these, five cases provide sufficient economic data, allowing the determination of actual unit costs, which range from approximately 16–20 USD/m³. A decreasing trend in unit cost is observed as the deposit volume increases, associated with economies of scale. In parallel, the regulatory frameworks of Brazil and Chile are analyzed, identifying relevant differences in the management of inactive deposits and mining liabilities.

Based on these findings, three representative Chilean tailings deposits located in Andacollo, Cabildo, and Copiapó are evaluated through cost estimations for different decharacterization alternatives. The results indicate that *in situ* reconfiguration alternatives present unit costs on the order of 2.27–3.57 USD/m³ for Flora 1, 2.91–3.6 USD/m³ for Cerro Negro 4, and 2.48 USD/m³ for Ojancos 1. In contrast, total removal alternatives with off-site disposal show a strong sensitivity to transport distance, reaching values of up to 6.25–6.83 USD/m³ in the case of Ojancos 1, highlighting the dominant role of logistics in total project costs. Cost estimates are developed following engineering cost criteria, with uncertainty levels consistent with AACE Classes 4 and 5, and are coherent with orders of magnitude observed in approved mine closure plans in Chile.

From an environmental and social perspective, the analysis shows that decharacterization contributes to improving the physical and hydraulic stability of tailings deposits, reducing residual risk associated with abandoned facilities, and creating favorable conditions for land recovery and reduced exposure of nearby communities. Overall, the results indicate that the application of the decharacterization approach in Chile is technically and economically feasible under specific conditions, particularly for *in situ* alternatives, and that its implementation would require the development of an explicit regulatory definition, appropriate financing mechanisms, and an institutional governance framework integrating technical, environmental, and social criteria.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Palabras clave: Descaracterización de relaves; Depósitos de relaves; Cierre de faenas; Reprocesamiento de relaves; Evaluación ambiental; Normativa minera; Sostenibilidad minera.

Keywords: Tailings decharacterization; Tailings storage facilities (TSF); Mine closure; Tailings reprocessing; Environmental assessment; Mining regulations; Sustainable mining.

1. Introducción

La minería constituye una de las principales actividades económicas de Chile y ha sido un motor relevante para su desarrollo productivo y territorial. Sin embargo, la acumulación histórica de depósitos de relaves —particularmente aquellos construidos mediante el método de aguas arriba— ha generado un conjunto significativo de pasivos ambientales y riesgos para comunidades e infraestructuras. La experiencia internacional ha demostrado que las fallas de depósitos de relaves pueden desencadenar impactos catastróficos en términos de pérdida de vidas humanas, degradación ambiental y daño reputacional para la industria y el Estado, como ocurrió en los desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019) en Brasil.

Como respuesta a estos eventos, Brasil avanzó hacia un modelo de gobernanza correctiva de alta exigencia, incorporando en su marco regulatorio la descaracterización obligatoria de presas de relaves construidas aguas arriba. Este proceso se define como la eliminación de la función hidráulica del depósito y su reconversión a una condición estable, monitoreada y compatible con usos futuros del territorio. La implementación de esta política —articulada entre la Agência Nacional de Mineração (ANM), los órganos ambientales y el Ministerio Público— ha dado lugar a una cartera de proyectos de descaracterización que constituyen hoy un referente internacional en términos de exigencias técnicas, trazabilidad y transparencia.

En el contexto chileno, el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves evidencia la existencia de numerosos depósitos activos, inactivos y abandonados, distribuidos a lo largo del territorio y sujetos a distintos niveles de gestión y control. Entre ellos, los depósitos abandonados construidos aguas arriba representan un foco prioritario de riesgo, al carecer de responsable identificado y de planes de cierre aprobados. Si bien Chile cuenta con un marco normativo robusto para el diseño, operación y cierre de depósitos en faenas activas —principalmente a través del D.S. N°248/2007 y la Ley N°20.551—, no existe aún una figura específica que aborde la eliminación progresiva de depósitos abandonados mediante procesos equivalentes a la descaracterización.

Esta carencia normativa, sumada a los desafíos asociados al cambio climático, la ocurrencia de eventos extremos y la creciente sensibilidad socioambiental en territorios mineros, plantea la necesidad de revisar y fortalecer las estrategias de gestión de relaves en el país. En particular, se abre la oportunidad de evaluar si la metodología brasileña de descaracterización podría constituir una alternativa viable para reducir el riesgo asociado a depósitos abandonados aguas arriba y, al mismo tiempo, habilitar procesos de recuperación territorial alineados con estándares internacionales como el Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM).

En este contexto, la presente memoria tiene por objetivo analizar la aplicabilidad del concepto de descaracterización desarrollado en Brasil al caso chileno, evaluando sus dimensiones técnicas, económicas, ambientales y sociales. Para ello, se seleccionan ocho casos brasileños de depósitos completamente descaracterizados y se contrastan con tres casos representativos de depósitos abandonados aguas arriba en Chile, localizados en las comunas de Copiapó, Andacollo y Cabildo. La comparación entre ambos contextos permite identificar condiciones de transferencia, brechas normativas, requerimientos de adaptación y órdenes de magnitud de costos, con el propósito de aportar insumos técnicos y estratégicos para la modernización de las políticas de cierre de faenas y la gestión de relaves abandonados en Chile.

2. Marco Teórico

El presente marco teórico tiene por finalidad fundamentar la investigación sobre la aplicabilidad de la metodología brasileña de descaracterización de depósitos de relaves abandonados en Chile. Para ello se revisan los conceptos básicos sobre depósitos de relaves y sus riesgos, el contexto nacional de relaves abandonados, la experiencia brasileña y el surgimiento de la descaracterización como política pública, así como los marcos de referencia internacionales en gestión de relaves y evaluación de costos. Finalmente, se presentan las dimensiones de análisis que guiarán la discusión: técnica, normativa, económica y ambiental-social.

2.1. Depósitos de relaves: definición, riesgos y fundamentos geotécnicos

Los depósitos de relaves corresponden a instalaciones de almacenamiento de residuos mineros constituidos por partículas finas de roca, agua y residuos químicos derivados de los procesos de concentración. Debido a su magnitud, complejidad y al potencial de daño asociado a una falla estructural, constituyen uno de los principales desafíos de seguridad para la minería moderna (Azam & Li, 2010; Blight, 2010).

Desde el punto de vista de la mecánica de suelos, los relaves son materiales finos, normalmente saturados o parcialmente saturados, cuyo comportamiento está fuertemente influenciado por la presión de poros, el grado de consolidación y las condiciones de drenaje. Los desarrollos clásicos de la mecánica de suelos y cimentaciones (Terzaghi et al., 1996) y, más recientemente, de los suelos no saturados (Fredlund et al., 2012) permiten comprender los mecanismos de licuefacción, pérdida de resistencia y deformaciones excesivas que pueden desencadenar la falla de una presa de relaves. En condiciones desfavorables de carga estática o sísmica, la combinación de alta saturación, baja densidad relativa y drenaje insuficiente incrementa significativamente la vulnerabilidad de estas estructuras.

2.1.1. Métodos de construcción de depósitos de relaves

Existen distintos métodos de construcción de depósitos, cada uno con características y niveles de riesgo específicos (Blight, 2010; Rico et al., 2008):

- **Método aguas arriba:** se construye en etapas sucesivas, apoyando cada nuevo muro sobre el propio material de relave depositado previamente. Es el método más económico, pero también el más riesgoso, especialmente en condiciones de saturación elevada o actividad sísmica significativa.
- **Método aguas abajo:** cada ampliación del muro se apoya sobre fundaciones estables, hacia el exterior del depósito, lo que proporciona mayor estabilidad y menor susceptibilidad a fallas.
- **Método de línea central:** cada etapa de construcción se ubica sobre la línea media del muro inicial, combinando costos moderados con un nivel de seguridad intermedio.
- **Métodos alternativos:** en las últimas décadas han surgido técnicas como los depósitos espesados y filtrados (*dry stacking*), que buscan reducir el contenido de agua y mejorar la

estabilidad física y química del material almacenado (International Commission on Large Dams & United Nations Environment Programme, 2001).

2.1.2. Vulnerabilidad del método aguas arriba

Diversos estudios han demostrado que el método de aguas arriba es particularmente vulnerable. Su principal debilidad radica en que los nuevos diques se levantan sobre material de relave previamente depositado, el cual presenta baja resistencia y alta permeabilidad, incrementando la probabilidad de licuefacción bajo sollicitaciones estáticas o sísmicas (Blight, 2010).

Azam y Li (2010) revisaron más de 147 fallas de depósitos de relaves ocurridas en el mundo durante un siglo, concluyendo que la mayoría de los colapsos correspondían a estructuras aguas arriba. Del mismo modo, Rico et al. (2008) identificaron que este método concentra la mayor proporción de desastres registrados en la base de datos mundial de fallas de relaves. En países con elevada sismicidad, como Chile, la vulnerabilidad del método aguas arriba es aún más crítica, pues la combinación de muros construidos sobre relave no consolidado y cargas dinámicas aumenta exponencialmente el riesgo de inestabilidad.

Esta condición explica por qué, tras los desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019) en Brasil —ambos depósitos construidos con esta técnica— se prohibió el uso del método y se estableció la obligación de su descaracterización (Agência Nacional de Mineração, 2019; Wise, 2016).

2.2. Clasificación y estados de los depósitos según SERNAGEOMIN

Además de los aspectos geotécnicos, la clasificación administrativa de los depósitos es clave para la gestión de riesgos. El Catastro Nacional de Relaves del Servicio Nacional de Geología y Minería (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2025) clasifica las instalaciones tanto por tipo de disposición como por estado operacional.

2.2.1. Tipos de instalaciones de relaves

Entre los principales tipos registrados se encuentran:

- **DREIM** (Depósito de Relaves en Interior de Mina): disposición de relaves en labores subterráneas.
- **Embalse**: relaves dispuestos en un cuerpo de agua artificial con estructuras de contención.
- **En pasta**: disposición con alta concentración de sólidos y baja fluidez.
- **Espesado**: disposición posterior a un proceso de espesamiento que reduce el contenido de agua.
- **Filtrado** (o *dry stacking*): disposición en forma de tortas filtradas con muy bajo contenido de humedad.
- **Pretilos de relave**: estructuras de baja altura que permiten la acumulación de material en superficie.

- **Tranque de relave:** forma más tradicional de depósito superficial con muros de contención.
- **S/I (sin información):** casos en que no existe claridad respecto al tipo de instalación.

Esta clasificación oficial constituye un insumo fundamental para la caracterización, fiscalización y análisis de riesgos a nivel país.

2.2.2. Estados operacionales de los depósitos

El catastro también clasifica los depósitos según su estado operacional, lo que refleja el nivel de gestión y responsabilidad existente sobre cada estructura:

- **Abandonado:** depósitos sin responsable definido ni planes de cierre aprobados. Representan el mayor riesgo, ya que carecen de gestión y monitoreo.
- **Activo:** depósitos en operación que reciben material de faenas mineras vigentes, sujetos a la normativa del D.S. N° 248/2007 y la Ley N° 20.551.
- **Inactivo:** depósitos que han dejado de operar, pero que aún cuentan con responsable y, en algunos casos, con planes de cierre en ejecución o aprobados.
- **En construcción:** instalaciones que están siendo implementadas, pero que aún no reciben material de forma regular.
- **En revisión:** depósitos que se encuentran en evaluación por parte de la autoridad, generalmente en procesos de actualización o regularización.

La consideración de estos estados es clave para identificar los depósitos de mayor riesgo en Chile, siendo los abandonados el objeto central de la presente investigación.

2.3. El contexto chileno: relaves abandonados y vacío normativo

Chile, como principal productor mundial de cobre, concentra una gran cantidad de depósitos de relaves distribuidos a lo largo de su territorio. De acuerdo con el Catastro Nacional de Relaves de Servicio Nacional de Geología y Minería (2025), existen 836 depósitos de relaves registrados, de los cuales 455 se encuentran en condición de abandono, lo que representa un 54,4 %, es decir más de la mitad de la totalidad de depósitos en Chile actualmente están abandonados. Estos depósitos carecen de responsable identificado y de planes de cierre aprobados, lo que los convierte en instalaciones críticas desde el punto de vista de la seguridad, la estabilidad y los riesgos ambientales. Entre estos, 244 fueron construidos con el método de aguas arriba, lo que representa un 29,2 % de la totalidad de los depósitos registrados hasta la fecha en el territorio chileno, incrementando considerablemente el riesgo asociado.

En el ámbito normativo, Chile cuenta con un marco regulatorio que establece directrices claras para depósitos activos, inactivos o en proceso de cierre, pero no aborda de manera específica la problemática de los depósitos abandonados. El Decreto Supremo N° 248/2007 establece normas de seguridad

para el diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves, con exigencias técnicas para asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones. Por su parte, la Ley N° 20.551 sobre Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, junto con su reglamento asociado (D.S. N° 41/2012), establece la obligación de presentar planes de cierre aprobados, acompañados de garantías financieras que aseguren su ejecución (**ley201120551**; Ministerio de Minería, 2007, 2012).

Sin embargo, tanto el D.S. N° 248 como la Ley N° 20.551 y su reglamento se aplican exclusivamente a instalaciones en operación o que cuentan con titular definido. Esto genera un vacío normativo para los depósitos abandonados, que permanecen fuera de los mecanismos de control y supervisión, pese a constituir un riesgo latente para las comunidades y el medio ambiente. En este escenario, cobra relevancia analizar metodologías internacionales, como la descaracterización brasileña, orientadas específicamente a la eliminación progresiva de depósitos en condiciones de riesgo, lo que permitiría explorar alternativas de aplicación adaptadas al contexto chileno.

2.4. Desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019) y giro global en la gestión de relaves

El 5 de noviembre de 2015 ocurrió la rotura de la presa de relaves Fundão, ubicada en el municipio de Mariana, estado de Minas Gerais (Brasil). La falla liberó aproximadamente 43 millones de metros cúbicos de relaves, afectando a los ríos Gualaxo do Norte, Carmo y Doce, y generando la muerte de 19 personas, el desplazamiento de comunidades completas y uno de los mayores desastres ambientales de la minería a nivel mundial (Wise, 2016).

El 25 de enero de 2019, el colapso de la presa de relaves Córrego do Feijão, en Brumadinho (también en Minas Gerais), provocó un evento de consecuencias aún más severas, con la liberación de cerca de 12 millones de metros cúbicos de relaves y un saldo superior a 270 víctimas fatales (Cambridge & Shaw, 2019). Ambos depósitos compartían un factor crítico: habían sido construidos con el método de aguas arriba, altamente vulnerable a fenómenos de licuefacción estática y a la pérdida de estabilidad en condiciones de saturación. Investigaciones posteriores demostraron deficiencias en el diseño, ausencia de drenajes adecuados y monitoreo insuficiente, lo que incrementó el nivel de riesgo hasta derivar en la falla catastrófica (Azam & Li, 2010; Blight, 2010).

Las consecuencias de ambos desastres fueron múltiples: sociales (pérdida masiva de vidas humanas, desplazamiento forzado de comunidades y deterioro de la confianza en la minería), ambientales (contaminación extensiva de cursos de agua, suelos y ecosistemas asociados, con efectos a largo plazo en biodiversidad y calidad del agua) y económicas (costos millonarios para las empresas responsables, daños en infraestructura local y pérdida de productividad).

Como respuesta, el gobierno brasileño promulgó la Resolução ANM n.º 4/2019, que estableció la prohibición del método aguas arriba y la obligación de implementar planes de descaracterización de todas las estructuras construidas con este sistema (Agência Nacional de Mineração, 2019). A nivel global, estos eventos impulsaron la elaboración del *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), liderado por el *International Council on Mining and Metals* (ICMM), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y los Principios para la Inversión Responsable (PRI), que fija estándares más exigentes en gobernanza de relaves (International Council on Mining and Metals et al., 2020).

2.5. La metodología brasileña de descaracterización

Tras los desastres de Mariana y Brumadinho, Brasil implementó un marco regulatorio orientado a eliminar progresivamente las presas de relaves construidas con el método de aguas arriba. La Resolução ANM n.º 4/2019 estableció la prohibición de este tipo de estructuras y definió la obligación de su descaracterización en plazos determinados (Agência Nacional de Mineração, 2019).

La descaracterización se entiende como el conjunto de acciones destinadas a eliminar la función de almacenamiento de residuos de un depósito de relaves, garantizando que deje de operar como una estructura de riesgo. Más que un simple cierre, implica la transformación integral del depósito, de manera que sus características constructivas y ambientales sean compatibles con usos futuros del territorio y con la reducción sostenible de los riesgos asociados (Agência Nacional de Mineração, 2019; Vale S.A., 2024).

Entre las principales medidas técnicas contempladas en la metodología destacan:

- **Reconformación geométrica de taludes:** modificación de la pendiente y estructura del depósito para mejorar la estabilidad física.
- **Sistemas de drenaje:** incorporación de drenes superficiales y subterráneos para reducir presiones de poros y controlar infiltraciones.
- **Coberturas superficiales:** instalación de capas impermeabilizantes y suelos de protección que reduzcan la percolación de agua y permitan procesos de revegetación.
- **Reprocesamiento parcial o total de relaves:** en casos donde existe valor económico en los minerales contenidos, los relaves son extraídos y reprocesados, reduciendo el volumen remanente.
- **Monitoreo post-intervención:** instalación de sistemas de vigilancia geotécnica e hidrogeológica para asegurar el desempeño de las medidas aplicadas en el largo plazo.

La aplicación de la descaracterización ha significado costos elevados y una alta complejidad técnica, dado que muchas presas se encuentran en regiones densamente pobladas o con condiciones geotécnicas desfavorables. Sin embargo, constituye una de las experiencias más relevantes a nivel mundial en materia de reconversión de depósitos de relaves de alto riesgo (Vale S.A., 2024). Este enfoque no solo busca garantizar la estabilidad física y química de las estructuras, sino también avanzar hacia la reintegración territorial de las áreas impactadas, permitiendo que los suelos recuperen aptitudes para otros usos productivos, ambientales o sociales.

2.6. Gobernanza institucional y evolución del proceso en Brasil

El proceso de descaracterización en Brasil involucra a tres organismos principales: la Agência Nacional de Mineração (ANM), la Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) y el Ministério Público de Minas Gerais (MPMG). La ANM ejerce la autoridad reguladora, emitiendo resoluciones técnicas y supervisando los cronogramas de eliminación de presas de relaves; la FEAM actúa como entidad ambiental estatal, responsable de las licencias, auditorías y monitoreo de las obras ejecutadas; mientras que el MPMG cumple un rol fiscalizador y sancionador mediante los *Termos de Compromisso*

Ambiental (TAC). Este esquema tripartito permite integrar las dimensiones técnica, ambiental y jurídica en un mismo proceso de supervisión, garantizando trazabilidad y cumplimiento normativo de las etapas de descaracterización.

La implementación de la metodología comenzó tras la promulgación de la Resolução ANM N° 4/2019, cuando se contabilizaban 84 depósitos de relaves aguas arriba que debían ser desmantelados en plazos escalonados según su nivel de riesgo (Fastmarkets, 2019). Cinco años después, informes oficiales muestran un avance significativo: para mediados de 2024 la cifra se había reducido a 52 presas en proceso de descaracterización, lo que implica una disminución de alrededor del 29 % respecto del total inicial (Agência Brasil, 2024).

El avance no ha sido homogéneo: algunas presas ya han sido totalmente descaracterizadas y reintegradas territorialmente, mientras que otras permanecen en fases preliminares de reconformación y drenaje. Entre los principales desafíos destacan los elevados costos de inversión, las restricciones técnicas derivadas de la geología local y el clima tropical, los tiempos de ejecución prolongados y la gestión de las expectativas y conflictos con comunidades. A pesar de estas dificultades, la experiencia brasileña constituye un precedente único a nivel internacional: nunca antes un país había asumido de manera obligatoria la eliminación masiva de presas de relaves de alto riesgo.

2.7. Referentes internacionales en gestión de relaves

Además del caso brasileño, países como Canadá y Australia han desarrollado marcos normativos y guías técnicas de referencia internacional para la gestión de relaves. Estos instrumentos, elaborados a partir de experiencias acumuladas y fallas históricas, establecen exigencias que superan en rigurosidad muchos marcos regulatorios vigentes.

En Canadá, la *Mining Association of Canada* implementa desde 2004 el programa *Towards Sustainable Mining* (TSM), que incluye un protocolo específico para la gestión de relaves (*Tailings Management Protocol*). Este protocolo exige la existencia de sistemas de gestión documentados, auditorías externas periódicas, manuales de operación y vigilancia, y reportes públicos de desempeño (Mining Association of Canada, 2019). El enfoque pone énfasis en la responsabilidad corporativa y la transparencia.

En Australia, el *Australian National Committee on Large Dams* publicó en 2019 la actualización de sus *Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure*, que establecen análisis de consecuencias de falla, factores de seguridad mínimos, revisiones técnicas independientes e incorporación de escenarios de cambio climático en el diseño y monitoreo (Australian National Committee on Large Dams, 2019). En paralelo, en Canadá y otros países se aplican las guías de la *Canadian Dam Association*, que también enfatizan la evaluación de consecuencias y la gestión de riesgos (Canadian Dam Association, 2019).

A nivel global, la ya mencionada *Global Industry Standard on Tailings Management* reúne estos aprendizajes en 15 principios que abarcan gobernanza corporativa, participación de partes interesadas, evaluación de riesgos, diseño y cierre, con especial énfasis en la estabilidad a perpetuidad y la rendición de cuentas (International Council on Mining and Metals et al., 2020). Estos marcos constituyen un referente clave para países como Chile, que buscan fortalecer su gestión de relaves y abordar de manera más proactiva los depósitos abandonados.

2.8. Clasificación de estimaciones de costos según AACE

En los estudios de ingeniería, los costos se estiman conforme a la clasificación propuesta por la *Association for the Advancement of Cost Engineering* (AACE International, 2016). Esta clasificación distingue cinco clases de estimaciones según el grado de definición del proyecto y el rango de precisión esperado. En esta memoria se utiliza un nivel de exactitud correspondiente a las Clases 4–5, asociadas a estudios de orden de magnitud o de factibilidad conceptual, con un rango de precisión típico de -30% a $+50\%$.

Este nivel resulta adecuado para evaluar proyectos de descaracterización en fase inicial, donde el alcance técnico aún no está completamente definido y las estimaciones se basan en factores unitarios de referencia (por unidad de volumen de relave intervenido), ajustados por contexto local, logística y complejidad geotécnica. La adopción explícita de la clasificación AACE permite transparentar las incertidumbres inherentes a los costos estimados y evitar interpretaciones erróneas sobre su grado de exactitud.

2.9. Dimensiones de análisis para la aplicabilidad en Chile

La aplicabilidad de la metodología brasileña de descaracterización en el contexto chileno requiere ser evaluada de manera integral, considerando factores técnicos, regulatorios, económicos y ambientales-sociales.

En la **dimensión técnica**, se analiza la factibilidad de aplicar medidas como la reconfiguración geométrica, la instalación de sistemas de drenaje, las coberturas superficiales y, eventualmente, el reprocesamiento de relaves en condiciones geotécnicas y climáticas distintas a las de Brasil. La alta sismicidad de Chile, su diversidad geológica y la variabilidad climática (desde zonas hiperáridas hasta regiones lluviosas) obligan a revisar la transferibilidad directa de las soluciones brasileñas y adaptar los diseños a normas locales y capacidades técnicas disponibles.

En la **dimensión normativa**, la principal dificultad radica en que la legislación chilena —compuesta por el D.S. N° 248/2007, la Ley N° 20.551 y el D.S. N° 41/2012— regula de manera clara los depósitos activos, inactivos y en cierre, pero no contempla mecanismos específicos para abordar depósitos abandonados. El análisis comparativo con Brasil, Canadá y Australia permite identificar buenas prácticas y posibles ajustes normativos que faciliten la adopción de estrategias de descaracterización para pasivos históricos.

La **dimensión económica** busca estimar los costos asociados a la implementación de medidas de descaracterización en depósitos abandonados, considerando obras de reconfiguración y drenaje, alternativas de reprocesamiento y eventuales ingresos derivados de la recuperación de minerales. Se utilizan estimaciones de Clase 4–5 (AACE International, 2016), elaborando métricas de costo por metro cúbico de relave intervenido y de costo-efectividad en reducción de riesgo, de manera de comparar opciones de intervención y priorizar depósitos según su relación riesgo–costo.

Por último, la **dimensión ambiental y social** se centra en los beneficios derivados de la reducción de riesgos y en la potencial recuperación de territorios para otros usos. Entre los beneficios ambientales esperados destacan la disminución de la probabilidad de fallas catastróficas, la mejora en la calidad de aguas y suelos y la rehabilitación de ecosistemas degradados. En el plano social,

la implementación de medidas de descaracterización puede contribuir a generar confianza en las comunidades, reducir conflictos socioambientales y fortalecer la percepción de responsabilidad tanto de la industria como del Estado frente a los pasivos ambientales mineros.

Estas cuatro dimensiones constituyen la base conceptual sobre la cual se estructura el análisis de la presente memoria y permiten evaluar, de manera integrada, la viabilidad y pertinencia de adaptar la experiencia brasileña de descaracterización al caso de los depósitos de relaves abandonados en Chile.

3. Objetivos

El presente trabajo tiene como propósito general analizar la aplicabilidad de la metodología brasileña de descaracterización de depósitos de relaves en el contexto chileno, considerando las condiciones técnicas, económicas, ambientales y normativas del país. La investigación busca aportar una base conceptual y comparativa que permita orientar la futura incorporación de este enfoque en la gestión de relaves abandonados, en concordancia con los estándares internacionales de seguridad y sostenibilidad minera.

3.1. Objetivo General

Analizar la aplicabilidad de la metodología brasileña de descaracterización de depósitos de relaves al contexto chileno, mediante la comparación de casos reales, el estudio del marco normativo vigente y la evaluación de las dimensiones técnicas, económicas, ambientales y sociales involucradas.

3.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar técnica y normativamente la metodología de descaracterización implementada en Brasil, identificando sus etapas, actores institucionales y resultados obtenidos en casos de depósitos completamente descaracterizados.
2. Seleccionar y analizar depósitos de relaves abandonados en Chile, ubicados en las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, considerando los criterios establecidos por el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves, con foco en aquellos construidos mediante el método de aguas arriba.
3. Comparar los resultados técnicos, económicos, ambientales y sociales entre los casos brasileños y chilenos, estimando los costos unitarios de descaracterización y evaluando su factibilidad de implementación en el contexto nacional, para finalmente proponer lineamientos estratégicos que orienten la incorporación del concepto de descaracterización en la política minera chilena.

4. Marco Metodológico

El marco metodológico describe el enfoque de investigación y los procedimientos aplicados para analizar la aplicabilidad del proceso brasileño de descaracterización de depósitos de relaves al contexto chileno. El estudio adopta un diseño de investigación aplicada, de tipo no experimental y enfoque descriptivo-comparativo, sustentado en la recopilación, sistematización y análisis técnico de información secundaria oficial y literatura especializada. La investigación se desarrolla de manera secuencial, integrando la dimensión normativa, técnica, económica, ambiental y social del proceso de descaracterización.

4.1. Diseño general de la investigación

La investigación se estructura en cuatro fases metodológicas principales:

1. **Recolección y validación de información técnica y normativa** de Brasil y Chile, proveniente de fuentes oficiales, académicas y corporativas.
2. **Selección y caracterización de casos de estudio:** ocho depósitos brasileños completamente descaracterizados y tres comunas chilenas con alta concentración de relaves abandonados aguas arriba (Copiapó, Andacollo y Cabildo).
3. **Estimación de costos y análisis de impactos** mediante fórmulas normalizadas y factores unitarios derivados de los casos brasileños, ajustados al contexto chileno.
4. **Síntesis comparativa y formulación de lineamientos**, orientada a establecer la factibilidad de implementar la descaracterización en Chile y los ajustes requeridos en su marco normativo y técnico.

El diseño metodológico busca garantizar la trazabilidad de cada dato y la reproducibilidad del análisis, asegurando que todos los cálculos y estimaciones puedan ser verificados a partir de las fuentes citadas.

4.2. Selección y caracterización de casos brasileños

La selección de los casos brasileños se basó en la completitud de la información técnica y financiera, y en su representatividad respecto del proceso nacional de descaracterización. Se incluyeron ocho estructuras de relaves cuya eliminación fue oficialmente declarada como concluida por la ANM y verificable mediante documentación pública. Cada caso fue caracterizado considerando:

- Método de construcción (aguas arriba).
- Volumen total de relave.
- Empresa operadora y ubicación geográfica.

- Etapas técnicas ejecutadas y cronología.
- Costos globales y parciales reportados.
- Indicadores ambientales (control de drenaje, revegetación, monitoreo post-cierre).

Los datos consolidados de cada estructura fueron homologados a dólares estadounidenses (USD) y año base 2025, aplicando los tipos de cambio oficiales del Banco Central de Brasil y el Índice Nacional de Precios al Consumidor Ampliado (IPCA).

4.3. Selección de casos en Chile

En el contexto chileno, la selección se focalizó en depósitos abandonados construidos por el método aguas arriba, debido a su mayor vulnerabilidad geotécnica. A partir del Catastro Nacional de Relaves (Servicio Nacional de Geología y Minería (2025)), se identificaron las tres regiones con más depósitos abandonados de este tipo: Atacama, Coquimbo y Valparaíso, seleccionando dentro de ellas las comunas con mayor concentración de estructuras: Copiapó, Andacollo y Cabildo.

Para cada comuna se consolidó una ficha técnica con las siguientes variables: volumen estimado, tipo de instalación, localización, altitud, proximidad a cursos de agua, infraestructura cercana y observaciones sobre condiciones ambientales. Esta información se sistematizó en una base de datos comparativa, empleada posteriormente para la estimación de costos de descaracterización.

4.4. Metodología de estimación de costos

La estimación de costos de descaracterización para los depósitos seleccionados en Chile se fundamenta en la transferencia de factores unitarios derivados de casos brasileños, ajustados por condiciones locales y actualizado monetariamente a valores de 2024. El procedimiento se enmarca en la clasificación de estimaciones Clase 4-5 de la AACE International (2016), correspondiente a estudios de orden de magnitud adecuados para etapas conceptuales de evaluación.

4.4.1. Consideraciones para casos con información incompleta

Es importante destacar que algunos de los casos brasileños analizados no presentan el mismo nivel de detalle o rigurosidad en la información financiera reportada. En ciertos depósitos, los *Relatórios de Recursos*, *Relatórios Trimestrais* u otros documentos oficiales sólo incluyen el valor global ejecutado por año, sin desagregación por partidas, empresas contratistas ni etapas constructivas específicas.

Ante esta heterogeneidad documental, se adoptó un procedimiento de estimación estructurada del costo por etapa, fundamentado en los antecedentes técnicos efectivamente disponibles. Dichos antecedentes incluyen: (i) el cronograma oficial de descaracterización; (ii) las etapas definidas en los proyectos ejecutivos y planes de trabajo; (iii) los equipos, maquinarias y servicios mencionados en los informes técnicos; (iv) el volumen total del depósito; y (v) el costo global de inversión reportado para la intervención.

A partir de esta información, el costo total fue redistribuido de manera proporcional entre las etapas características del proceso de descaracterización, manteniendo consistencia con la metodología aplicada en los casos que sí cuentan con datos completos. Este enfoque permite **homogeneizar la estructura de costos**, evitar la exclusión de casos relevantes por falta de desagregación contable y asegurar la comparabilidad de resultados entre distintos depósitos brasileños, así como su posterior contraste con los casos chilenos.

4.4.2. Metodología de estandarización y ajuste de costos para los casos brasileños

El análisis económico de los procesos de descaracterización considerados en este estudio se construyó a partir de la sistematización de los valores reportados en los diferentes *Relatórios de Recursos Empregados*, *Relatórios Trimestrais*, *Relatórios Técnicos de Avaliação* y documentos complementarios emitidos por las empresas responsables de las obras. Cada informe presenta los costos ejecutados según los servicios contratados, el período de ejecución y el tipo de actividad, lo que permitió consolidar inicialmente todos los ítems de gasto informados.

Debido a que cada proyecto de descaracterización en Brasil organiza sus costos con criterios propios—diferente nivel de desagregación, nomenclatura y agrupación por empresa ejecutora—el primer paso metodológico consistió en la identificación, extracción y clasificación de todos los costos reportados, manteniendo inicialmente la estructura original de cada caso. Posteriormente, con el fin de posibilitar la comparación entre depósitos con contextos distintos y preparar la aplicación del modelo a los casos chilenos, se procedió a una agrupación funcional de los servicios en categorías mayores. Estas categorías consideran similitudes operacionales e incluyen, entre otras, maquinaria y operación en terreno, personal y equipos técnicos, monitoreo y topografía, construcción y drenaje, ingeniería y control de seguridad, revegetación y seguridad ambiental, y mantención general de equipos y estructuras.

Una vez estructurados los costos nominales, se aplicó un ajuste temporal destinado a homogeneizar los valores entre distintos años, incorporando la variación anual de los costos de materiales, equipos y servicios industriales. Para ello se utilizó el Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) (Chemical Engineering Magazine, 2024), el cual permite actualizar costos históricos mediante la relación:

$$\text{Costo ajustado por CEPCI} = \text{Costo reportado} \times \left(\frac{\text{CEPCI del año base}}{\text{CEPCI del año del gasto}} \right) \quad (1)$$

En este estudio se adoptó como año base el 2024 (CEPCI = 800). La Tabla 1 resume los valores utilizados y el factor correspondiente para cada año.

Tabla 1: Valores CEPCI y factores de ajuste utilizados.

Año	CEPCI	CEPCI a utilizar	Factor de ajuste
2022	816	0.98	1.05
2023	797	1.00	1.07
2024	800	–	–

Además de los factores territoriales y operacionales, se incorporó un ajuste macroeconómico basado en la comparación entre el Índice de Costos de la Construcción (ICC) de Chile y el Índice de Preços ao Produtor (IPP) para la construcción/industria de Brasil, ambos considerando el año 2020 como base igual a 100 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024; Instituto Nacional de Estadísticas de Chile, 2024). A partir de esta referencia común, se analizó la variación acumulada de ambos indicadores hasta el año 2024. Durante este periodo, el ICC presentó un incremento del orden de 18,7 %, mientras que el IPP brasileño aumentó aproximadamente 10,8 %. El factor se calculó como:

$$\text{Factor país} = \frac{\text{ICC (Chile)}}{\text{IPP (Brasil)}} \quad (2)$$

La relación entre ambas variaciones entrega un factor de corrección de aproximadamente 1,07, lo que implica que, en promedio, los costos de construcción en Chile durante 2024 son un 7 % superiores a los observados en Brasil para el mismo período. Este factor se emplea como un ajuste complementario que permite homogeneizar las comparaciones y asegurar que las estimaciones económicas entre ambos países se expresen en términos relativos consistentes.

El costo final ajustado para cada categoría se obtuvo mediante:

$$\text{Costo final} = \text{Costo nominal} \times \text{Factor CEPCI} \times \text{Factor país} \quad (3)$$

Finalmente, todos los valores reportados por las empresas se encuentran expresados en reales brasileños (BRL). Para facilitar la comparación entre casos brasileños y la posterior aplicación de los resultados a los depósitos chilenos, se adoptó una tasa de conversión fija basada en un valor representativo promedio del período 2021–2025:

$$1 \text{ USD} = 5 \text{ BRL} \quad (4)$$

La Tabla 2 presenta, a modo referencial, la evolución del tipo de cambio BRL/USD durante el período considerado.

Tabla 2: Tipo de cambio promedio anual BRL/USD (referencial).

Año	BRL por USD
2021	5.39
2022	5.16
2023	4.99
2024	5.03
2025	4.92

Mediante este procedimiento, los costos de cada caso brasileño quedan ajustados temporalmente, normalizados entre países, agrupados por categoría funcional y expresados en una misma moneda. Esto permite la obtención de un costo total consolidado y de un costo unitario por metro cúbico,

además de garantizar una base metodológica homogénea para la comparación posterior con los depósitos chilenos.

4.4.3. Metodología de obtención de costos para los casos chilenos

La estimación de costos para los casos chilenos analizados (Flora 1, Cerro Negro 4 y Ojancos 1) se desarrolló mediante un enfoque *bottom-up*, consistente con metodologías de evaluación económica utilizadas en proyectos mineros y de cierre de faenas, y alineado con los procesos de descaracterización documentados en los casos brasileños estudiados.

Este enfoque consiste en descomponer cada alternativa de descaracterización en etapas operacionales, identificar los recursos requeridos (maquinaria, mano de obra e insumos) y estimar los costos a partir de rendimientos unitarios y costos horarios, permitiendo trazabilidad técnica y coherencia entre depósitos de distinta escala.

Definición de alternativas y etapas operacionales

Para cada depósito se definieron alternativas de descaracterización específicas, acordes a su contexto territorial, ambiental y operacional. En términos generales, las alternativas se estructuraron en las siguientes etapas operacionales:

- preparación y habilitación del sitio;
- movimiento de tierras (excavación, redistribución o carguío);
- transporte interno o externo del material, cuando corresponde;
- conformación geomorfológica y/o disposición controlada;
- manejo de aguas y drenaje superficial;
- control ambiental y monitoreo durante la ejecución;
- cobertura superficial, revegetación y cierre progresivo.

La inclusión y relevancia de cada etapa varía según el tipo de alternativa y las características particulares de cada depósito.

Dimensionamiento de maquinaria y frentes de trabajo

El dimensionamiento de la maquinaria se realizó considerando el volumen total del depósito, la necesidad de operar con frentes de trabajo simultáneos en depósitos de gran escala, las restricciones logísticas y ambientales del entorno, y la experiencia observada en procesos de descaracterización de gran volumen desarrollados en Brasil.

Para cada alternativa se definió explícitamente la cantidad de equipos principales, incluyendo excavadoras hidráulicas, camiones tolva, cargadores frontales y equipos auxiliares, lo que permitió estimar las horas de operación requeridas y los costos asociados.

Rendimientos y costos unitarios

La estimación de costos operacionales se basó en rendimientos horarios de producción y en costos unitarios por Hora Máquina (HM) y Hora Hombre (HH), provenientes de antecedentes de proyectos mineros desarrollados en Chile y valores entregados por la industria. Con el fin de asegurar comparabilidad entre los casos chilenos, se mantuvieron constantes los valores base de rendimiento y costos unitarios, ajustando únicamente el dimensionamiento de flota y la secuencia operacional según las particularidades de cada depósito.

Rendimientos horarios empleados

Los rendimientos referenciales utilizados para la estimación se resumen en la Tabla 3. Estos valores se emplearon como tasas de producción para convertir volúmenes a horas efectivas de operación.

Tabla 3: Rendimientos horarios referenciales utilizados en las estimaciones.

Equipo	Rendimiento	Unidad
Camión tolva	18	m ³ /h
Excavadora hidráulica	90	m ³ /h
Cargador frontal	100	m ³ /h

Costos unitarios por Hora Máquina (HM)

Los costos HM corresponden al costo de arriendo/uso del equipo por hora (incluyendo costos asociados al equipo). Los valores utilizados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Costos unitarios referenciales por Hora Máquina (HM).

Equipo	Costo (USD/HM)
Camión tolva 20 m ³	35,69
Cargador frontal	78,34
Excavadora hidráulica	53,32

Costos unitarios por Hora Hombre (HH)

Los costos HH representan el costo horario del personal asociado a operación y supervisión. Los valores referenciales utilizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Costos unitarios referenciales por Hora Hombre (HH).

Cargo	Costo (USD/HH)
Jefe de turno	34,12
Operador camión tolva	17,80
Operador cargador frontal	17,80

Jornada y horas disponibles

Se consideró una jornada de 12 h/día, 5 días/semana. Por tanto, las horas planificadas por semana se estiman como:

$$H_{\text{sem}} = 12 \times 5 = 60 \text{ h/semana} \quad (5)$$

Fórmulas base empleadas para el cálculo de costos

Conversión de volumen a horas de operación

Para una actividad con volumen V (m^3) ejecutada por un equipo con rendimiento Q (m^3/h), las horas requeridas por un equipo se estiman como:

$$H = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

Cuando operan n equipos simultáneamente (p.ej., n camiones o n excavadoras), las horas calendario equivalentes se aproximan mediante:

$$H_{\text{cal}} = \frac{V}{n \cdot Q} \quad (7)$$

Costo de maquinaria (HM)

El costo directo por maquinaria para una actividad se estimó como:

$$C_{\text{HM}} = H \cdot c_{\text{HM}} \quad (8)$$

donde c_{HM} es el costo unitario (USD/HM) del equipo.

Costo de mano de obra (HH)

El costo directo de mano de obra se calculó como:

$$C_{\text{HH}} = \sum_{i=1}^k (H_i \cdot c_{\text{HH},i}) \quad (9)$$

donde H_i corresponde a las horas del cargo i y $c_{\text{HH},i}$ es su costo unitario (USD/HH). En términos operacionales, para equipos con un operador dedicado, se consideró una asignación 1:1 (un operador por equipo durante las horas efectivas de operación) y supervisión por turno según la escala del proyecto.

Costo directo total y costo unitario

El costo directo total de la alternativa se estimó como la suma de costos de maquinaria, mano de obra y costos directos complementarios (control ambiental, drenaje, monitoreo, revegetación, entre otros):

$$C_{\text{dir}} = C_{\text{HM}} + C_{\text{HH}} + C_{\text{otros}} \quad (10)$$

El costo unitario normalizado por volumen se definió como:

$$c_u = \frac{C}{V} \quad (11)$$

Gastos generales, seguridad e imprevistos

A los costos directos se incorporó un recargo del 15% asociado a gastos generales, HSE e imprevistos:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{dir}} \cdot (1 + 0.15) \quad (12)$$

Dimensionamiento operacional y duración estimada

La duración estimada de una etapa se deriva de la relación entre volumen, rendimiento y número de equipos (Ecuación 7), y se convierte a semanas o meses en función de la jornada considerada. Este criterio permite dimensionar la flota por escala (y no por un plazo impuesto), consistente con intervenciones progresivas y sectorizadas observadas en procesos de descaracterización de gran volumen.

4.5. Evaluación ambiental y social

La evaluación ambiental y social se realiza de forma comparativa y cualitativa, sustentada en los indicadores ambientales y comunitarios registrados en los proyectos brasileños. Se analizan los siguientes aspectos:

- **Ambientales:** reducción de drenaje ácido, control de erosión y escorrentía, mejora en la calidad del agua (turbidez, pH, metales disueltos), revegetación y estabilidad superficial.
- **Sociales:** percepción de riesgo, restauración paisajística, reasignación de usos del suelo y beneficios para comunidades locales.

La magnitud de cada efecto se clasifica según criterios de impacto (alto, medio, bajo) y temporalidad (corto, mediano, largo plazo), construyéndose una matriz de impacto ambiental-social para los depósitos seleccionados en Chile.

4.6. Análisis comparativo y síntesis integradora

Los resultados técnicos, económicos y ambientales de los casos brasileños y chilenos se integran mediante tablas de comparación estructurada y gráficos de correlación. El análisis busca identificar:

- Factores que explican variaciones en costos unitarios (escala, topografía, tipo de mineral).
- Brechas entre las normativas brasileña y chilena.
- Beneficios ambientales y sociales transferibles.
- Condiciones necesarias para la implementación del proceso en Chile.

Finalmente, se formula una síntesis metodológica y propositiva que integra las evidencias obtenidas, estableciendo los lineamientos estratégicos para la eventual incorporación del concepto de descaracterización en la política minera nacional.

5. Presentación de Resultados

5.1. Análisis comparativo normativo y benchmarking internacional

La comparación internacional se enfoca en identificar los principales enfoques regulatorios, técnicos, económicos y ambientales aplicables al cierre o descaracterización de depósitos de relaves, contrastando las experiencias de Brasil, Chile, Canadá y Australia.

A continuación, la Tabla 6 presenta un resumen de los criterios más relevantes de cada país, basada en fuentes oficiales de referencia (Agência Nacional de Mineração, 2019; Australian National Committee on Large Dams, 2019; Canadian Dam Association, 2019; Mining Association of Canada, 2019; Servicio Nacional de Geología y Minería, 2025).

Tabla 6: Benchmarking internacional de descaracterización y cierre de depósitos de relaves.

Dimensión	Brasil	Chile	Canadá	Australia
Técnica	Eliminación total de la función hidráulica (<i>des-caracterização</i>); drenajes, coberturas y restitución geomorfológica.	Foco en estabilidad física y química (DS 248/2007); no contempla descaracterización.	Diseño y operación según <i>CIM Best Practices</i> ; monitoreo geotécnico avanzado y control de aguas.	Guía ANCOLD (2019): gestión integral de TSF con criterios de diseño probabilístico y rehabilitación progresiva.
Normativa	Regulada por FEAM, ANM y MPMG; obligatoriedad de TAC y cronogramas de descaracterización post-Brumadinho.	Supervisión de SERNAGEOMIN; obligación de cierre seguro, sin exigencia de eliminación funcional del depósito.	Marco federal y provincial robusto; auditorías externas y responsabilidad del operador bajo el <i>Mining Act</i> .	Normas estatales y federales coordinadas; obligatoriedad de <i>Mine Closure Plans</i> aprobados antes de operar.
Económica	Financiamiento del titular mediante compromisos ambientales; costos entre 4-27 USD/m ³ .	Sin mecanismos de garantía financiera específicos; costos asumidos por el titular o el Estado en depósitos huérfanos.	Fondos de garantía obligatorios (<i>Financial Assurance</i>); cobertura de costos post-cierre hasta 100%.	Requiere <i>Rehabilitation Bonds</i> o depósitos en fideicomiso; auditoría de costos y plazos.
Ambiental	Revegetación obligatoria; monitoreo continuo y post-cierre y eliminación del riesgo hidráulico.	Evaluación ambiental limitada a la estabilidad; revegetación parcial o voluntaria.	Planes de rehabilitación detallados con seguimiento bianual y monitoreo de calidad de agua.	Integración de biodiversidad y uso futuro; recuperación progresiva del terreno y control de erosión eólica.

La comparación muestra que Brasil y Chile comparten marcos regulatorios prescriptivos, pero con distintos alcances: Brasil aborda la eliminación total del riesgo hidráulico, mientras que Chile solo regula la estabilidad física y química. En contraste, Canadá y Australia aplican marcos integrales y proactivos, centrados en la gestión de riesgos y la rehabilitación a perpetuidad, apoyados en esquemas de transparencia corporativa y auditorías independientes.

5.2. Alineamiento con el estándar GISTM (ICMM–UNEP–PRI, 2020)

El estándar GISTM establece 15 principios agrupados en cuatro ejes: Gobernanza, Riesgo, Transparencia y Restauración Ambiental. La Tabla 7 resume el grado de cumplimiento de estos principios en los cuatro países analizados, basado en evidencia documental.

Tabla 7: Alineamiento de los marcos regulatorios nacionales con los principios GISTM.

Eje	Principios relevantes GISTM	Brasil	Chile	Canadá / Australia
Gobernanza	Responsabilidad del operador y gestión del riesgo.	Cumple (Res. ANM 4/2019; FEAM 2024).	Parcial (Ley 20.551 no cubre relaves abandonados).	Cumple (TSM; ANCOLD 2019).
Riesgo y seguridad	Evaluación de estabilidad a perpetuidad, monitoreo continuo y revisión independiente.	Cumple parcialmente (FEAM 2023).	Parcial (DS 248/2007).	Cumple (Mining Act 2015; Guidelines 2019).
Transparencia y participación	Reportes públicos, consulta comunitaria y accesibilidad de información.	Parcial (TAC y audiencias públicas).	Bajo (sin mecanismo formal).	Cumple (TSM <i>Public Reporting</i>).
Restauración ambiental	Rehabilitación integral, monitoreo post-cierre y re-integración territorial.	Cumple (FEAM 2023; Vale 2024).	Parcial (Guía SERNA-GEOMIN 2018).	Cumple (<i>Mine Closure Plans</i>).

5.3. Resultados técnicos y económicos de los casos brasileños

Los cinco depósitos seleccionados se ubican en el Estado de Minas Gerais (MG)¹, epicentro del proceso de descaracterización tras Brumadinho. Todos fueron construidos mediante el método aguas arriba y posteriormente intervenidos bajo la supervisión de la ANM y FEAM.

5.3.1. Caso brasileño 1: Barragem B1 – Itaminas Mineração S.A. (Sarzedo/MG)

La Barragem B1 es una estructura de disposición de sedimentos ubicada en el municipio de Sarzedo, estado de Minas Gerais (Brasil), perteneciente a Itaminas Mineração S.A. Originalmente fue construida mediante la metodología aguas arriba. En cumplimiento con la nueva normativa del país y del termino de compromiso firmado con el Ministério Público do Estado de Minas Gerais en 2022, la empresa desarrolló un proyecto integral de descaracterización, cuyas obras fueron acompañadas por equipo técnico independiente y fiscalizadas por ANM, FEAM, SEMAD y MPMG.

¹MG: Estado de Minas Gerais, Brasil.

De acuerdo con el *Relatório Mensal de Acompanhamento* de abril de 2024, elaborado por MLF Geomecânica, B1 funcionaba como una barragem de sedimentos vinculada a la clarificación de escorrentías y captación de agua industrial del complejo minero (Itaminas Mineração S.A., 2025). El volumen útil actual del reservorio, determinado mediante levantamiento topográfico, corresponde a 817.700 m³, valor adoptado como referencia en el presente análisis. En agosto de 2023, una vez concluida su descaracterización, la estructura fue formalmente retirada de la jurisdicción de la ANM como presa de relaves, pasando a ser clasificada como reservorio de agua industrial.

La descaracterización de B1 siguió el procedimiento técnico descrito en el *Projeto de Descaracterização*, iniciado en agosto de 2020 y desarrollado por etapas secuenciales. Las actividades iniciales incluyeron la construcción del canal de desvío del arroyo Engenho Seco, la implantación del sistema de captación de agua industrial y el descenso controlado del nivel freático del reservorio. Posteriormente se ejecutó la remoción del muro, el cual caracterizaba la tipología aguas arriba, junto con la limpieza y preparación de la fundación para la construcción del nuevo muro compactado aguas abajo, conforme a los factores de seguridad establecidos en el proyecto (Itaminas Comércio de Minérios S.A., 2024, 2025).

La etapa de mayor magnitud correspondió al movimiento de tierras y a la reconfiguración geométrica: se ejecutaron excavaciones, rellenos compactados y un sistema de drenaje interno con tapete drenante, seguidos por la instalación de drenaje superficial definitivo, revestimiento vegetal, regularización de taludes y conformación final del reservorio. Durante la segunda quincena de abril de 2023 se completaron las obras de drenaje superficial, la instalación de instrumentos geotécnicos (piezómetros, INAs, marcos topográficos) y la revegetación de taludes. Todas las etapas del proyecto ejecutivo se encuentran concluidas según lo indicado en el informe de cumplimiento de abril de 2024 (Itaminas Comércio de Minérios S.A., 2024).

A lo largo del proceso se mantuvo un programa continuo de monitoreo e instrumentación, con visitas mensuales realizadas por MLF Geomecânica, análisis de estabilidad, actualización de modelos digitales y lectura de instrumentos (piezómetros y indicadores de nivel). El *Relatório de Recursos* de febrero de 2025 confirma que las obras de descaracterización finalizaron en mayo de 2023, alcanzando un costo total ejecutado de R\$ 24.917.582,14 (Itaminas Comércio de Minérios S.A., 2025).

Con el fin de evaluar los requerimientos económicos del proyecto, los costos fueron desagregados en cinco etapas técnicas coherentes con el cronograma y las actividades ejecutadas: (1) drenaje y manejo de aguas; (2) reconfiguración geométrica; (3) coberturas superficiales; (4) revegetación; y (5) monitoreo e instrumentación. La Tabla 8 presenta los valores totales y los costos unitarios calculados sobre el volumen actual del reservorio. El costo total acumulado de la descaracterización asciende a 5,37 millones de USD, lo que se traduce en un costo unitario de 6,57 USD/m³, considerando el volumen actual del reservorio de 817.700 m³.

Tabla 8: Costos de descaracterización por categoría para la Barragem B1 – Itaminas.

Categoría	Costo total (USD)	Costo unitario (USD/m ³)
Drenaje y manejo de aguas	877 500.8	1.073
Reconformación geométrica	2 481 666.4	3.036
Coberturas superficiales	1 201 949.7	1.470
Revegetación	604 544.0	0.739
Monitoreo e instrumentación	207 618.7	0.254
Total	5 373 280.6	6.57

La Figura 1 sintetiza la distribución porcentual, donde destaca la reconformación geométrica con cerca del 46 % del costo total, seguida por coberturas superficiales (22 %) y drenaje (16 %).

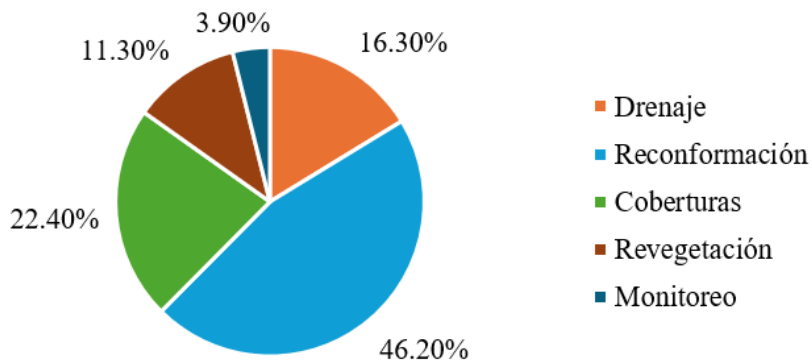


Figura 1: Distribución porcentual de los costos de descaracterización por categoría de la Barragem B1.

En conjunto, la Barragem B1 constituye un caso representativo de descaracterización de una estructura elevada aguas arriba de escala intermedia, en la cual la mayor proporción de recursos se destinó a la eliminación del muro aguas arriba y a la construcción del nuevo muro aguas abajo. El proyecto cumplió con el marco regulatorio brasileño y permitió transformar la estructura original en un reservorio hidráulico seguro, sujeto a monitoreo geotécnico permanente.

5.3.2. Caso 2: Barragem de Arêdes (SAFM Mineração)

La Barragem de Arêdes, ubicada en el municipio de Itabirito, estado de Minas Gerais (Brasil), corresponde a un depósito de relaves cuya descaracterización fue ejecutada por SAFM Mineração Ltda. entre los años 2022 y 2025. De acuerdo con los Informes de recursos empleados e informe de evaluación y cronograma del proyecto, el volumen remanente del reservorio al inicio del proceso alcanzaba aproximadamente los 417.000 m³, cifra determinada mediante levantamientos topográficos y controles volumétricos realizados durante la etapa inicial del proyecto (SAFM Mineração Ltda, 2022d).

La intervención se desarrolló conforme a las directrices de la Resolução ANM nº 4/2019, la cual establece la eliminación obligatoria de estructuras de relaves que mantengan función hidráulica. En el caso de Arêdes, la metodología de descaracterización consistió en la remoción completa del material almacenado en el reservorio, su traslado hacia la Pilha Noroeste (Pilha NW) y su posterior compactación y estabilización, siguiendo un diseño geomorfológico previamente definido.

El proceso estuvo dominado por actividades de movimiento de tierras, que representaron la mayor proporción del esfuerzo técnico y financiero. Estas labores incluyeron el uso intensivo de maquinaria pesada —pé de carneiro, tractores, excavadoras y camiones— junto con el alquiler de equipos y la operación continua de empresas contratistas como EXE Mineral, Cristal, ALFA y Novo Dia. Estas actividades permitieron el retiro progresivo del material del reservorio y su disposición controlada en la Pilha NW.

A lo largo de la ejecución se desarrollaron además trabajos específicos de drenaje y manejo de aguas, particularmente durante los primeros años, con el objetivo de controlar escurrimientos superficiales y asegurar condiciones hidráulicas estables durante la remoción del material. Estas intervenciones incluyeron la instalación de drenes de fondo y obras complementarias de canalización.

Una vez avanzado el vaciamiento del reservorio, se realizaron trabajos de reconfiguración geomorfológica orientados a la corrección de taludes, regularización de cotas y conformación definitiva de la Pilha Noroeste, de acuerdo con los parámetros establecidos en el proyecto. Paralelamente, se ejecutaron medidas de revegetación y estabilización superficial, principalmente mediante la empresa Nova Safra, consistentes en la siembra y tratamiento de taludes para minimizar procesos erosivos y favorecer la recuperación ambiental del área intervenida (SAFM Mineração Ltda, 2022c).

Durante todo el período, la operación mantuvo un programa permanente de monitoreo e instrumentación, que incluyó levantamientos topográficos periódicos, controles de volumen removido, actualización de modelos digitales, ensayos de laboratorio y la emisión de informes de seguridad estructural por consultoras externas especializadas. Este monitoreo permitió documentar la evolución del proceso y verificar la estabilidad geotécnica de las áreas afectadas.

Finalmente, el proyecto incluyó costos asociados a la gestión y operación, tales como la mantención del equipo técnico de SAFM, auditorías independientes, capacitación, vigilancia patrimonial y mantenimiento de maquinaria. Estos componentes permitieron sostener adecuadamente la ejecución continua del proyecto y asegurar el cumplimiento de los requisitos regulatorios.

Los gastos reales reportados en los informes de recursos empleados evidencian una inversión sostenida entre 2022 y 2025, con incrementos en los períodos de mayor intensidad operativa (SAFM Mineração Ltda, 2025a). El proceso concluyó en 2025 con la remoción total del material del reservorio, la estabilización final de la Pilha Noroeste y la eliminación completa de la función hidráulica del depósito, cumpliendo así con los criterios de descaracterización establecidos por la Agência Nacional de Mineração.

Con el fin de evaluar los requerimientos económicos del proyecto, se sistematizaron los costos ejecutados entre 2022 y 2025, agrupándolos en siete categorías técnicas: (1) personal y equipos técnicos; (2) maquinaria y operación en terreno; (3) topografía y monitoreo técnico; (4) construcción y drenaje; (5) ingeniería y control de seguridad; (6) revegetación y seguridad ambiental; y (7) mantención general de equipos y estructuras.

La Tabla 9 presenta los costos consolidados en reales brasileños (R\$), valores convertidos a dólares estadounidenses (USD) y el costo unitario por metro cúbico de relave.

Tabla 9: Costos de descaracterización por categoría para la Barragem Arêdes.

Categoría	Costo total (USD)	Costo unitario (USD/m ³)
Personal y equipos técnicos	605 660	1.45
Maquinaria y operación en terreno	4 332 073	10.39
Topografía y monitoreo técnico	153 169	0.37
Construcción y sistema de drenaje	92 503	0.22
Ingeniería y control de seguridad	175 824	0.42
Revegetación y seguridad ambiental	493 582	1.18
Mantenimiento general de equipos y estructuras	845 011	2.03
Total	6 697 822	16.06

La Figura 2 muestra la distribución porcentual asociada a cada categoría, destacando que la maquinaria y operación en terreno representa aproximadamente el 65 % del costo total, seguida de la mantenimiento general de equipos y estructuras (13 %), personal técnico (9 %) y revegetación (7 %). Los demás grupos presentan valores menores, coherentes con la naturaleza altamente mecanizada del proceso de descaracterización.

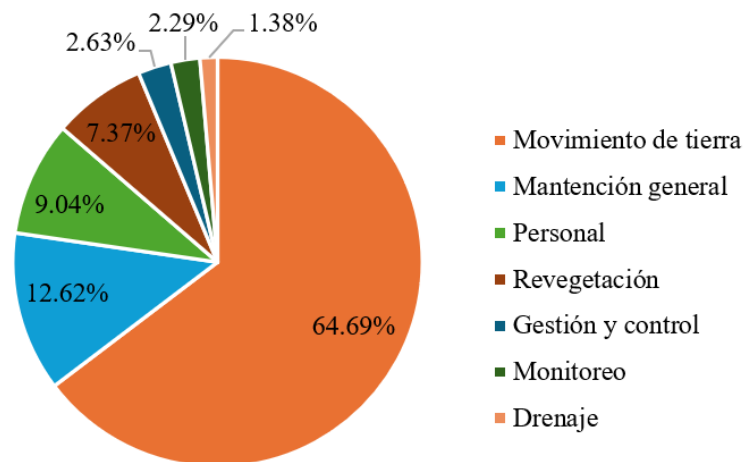


Figura 2: Distribución porcentual de costos por categoría para la Barragem Arêdes.

En síntesis, la Barragem Arêdes constituye un caso representativo de descaracterización integral en estructuras construidas aguas arriba, donde la mayor proporción de recursos se destina a actividades de movimiento de material y estabilización geomorfológica. El proyecto cumple con el marco regulatorio brasileño y se alinea con las mejores prácticas internacionales de cierre seguro de instalaciones de residuos mineros.

5.3.3. Caso 3: Barragem dos Alemães – Gerdau Açominas S.A. (Ouro Preto/MG)

La Barragem dos Alemães corresponde a una estructura de disposición de sedimentos ubicada en el distrito de Miguel Burnier, municipio de Ouro Preto, estado de Minas Gerais (Brasil), perteneciente a Gerdau Açominas S.A. El dique de partida fue construido en 2010 y posteriormente alteado mediante el método aguas arriba en 2014, alcanzando una altura aproximada de 57 m y una cota de coronamiento de 1.195 m . Tras los accidentes ocurridos en Brasil y las normativas que nacieron de esos episodios, motivó la firma de un acuerdo de compromiso entre Gerdau, FEAM, ANM, MPMG y MPF para su descaracterización integral (Gerdau Açominas S.A., 2022f).

El volumen del reservorio, determinado mediante el levantamiento topográfico más reciente, corresponde a aproximadamente 3,27 millones de m³ (S.A., 2023). De acuerdo con el proyecto ejecutivo de descaracterización, la intervención consistió en transformar completamente la condición hidráulica y geotécnica de la presa mediante la construcción de un muro aguas abajo, diseñado para encapsular los muros construidos aguas arriba y modificar el método constructivo hacia un esquema equivalente al elevamiento aguas abajo. Este muro incorpora una estructura robusta de rellenos compactados, con un volumen aproximado de 310.000 m³ (Gerdau Açominas S.A., 2022c), seguida de la implantación de un sistema de drenaje interno independiente compuesto por filtro vertical, tapete drenante y dren al pie de enrocado.

La secuencia constructiva inició en junio de 2021 con actividades preparatorias como supresión vegetal, apertura de accesos, escarificación y limpieza de la fundación, retiro de materiales sueltos y construcción de desvíos superficiales temporales. Posteriormente se ejecutó la conformación del muro de adecuación, que incluyó excavaciones controladas, rellenos compactados con control tecnológico continuo, conformación de taludes y bermas, instalación del drenaje interno y construcción del sistema definitivo de drenaje superficial (canales de coronamiento, drenaje de bermas y canal de desvío en la zona izquierda).

Durante 2022 y 2023 se instalaron y actualizaron instrumentos geotécnicos como piezómetros, inclinómetros, indicadores de nivel de agua y marcos topográficos, junto con el monitoreo mediante georradar y la automatización de equipos. El proceso contó con acompañamiento técnico continuo por parte de DAM, responsable de la supervisión técnica de obras de construcción, y con auditoría independiente conforme a lo exigido en el término de compromiso. Según el informe final de su auditoría, las obras fueron concluidas el 12 de julio de 2023, verificándose la estabilidad global, el funcionamiento del sistema de drenaje y el cumplimiento de los requisitos técnicos del proyecto ejecutivo (Gerdau Açominas S.A., 2022a, 2023a).

En lo referente al desempeño económico, el informe de recursos empleados indica que hasta el 20 de junio de 2023 se ejecutó un total de US\$ 26.775.367,30 en la descaracterización de la estructura, considerando tanto la ejecución directa como la permanencia de contratos de fiscalización, monitoreo y apoyo técnico (Gerdau Açominas S.A., 2023b). Dado que los informes oficiales no presentan un desglose detallado por actividad, los costos fueron organizados en cinco grandes etapas técnicas coherentes con el proyecto ejecutivo y con la metodología utilizada para los casos B1 y Arêdes: (1) movimiento de tierras y muro de adecuación; (2) drenaje superficial y obras complementarias; (3) instrumentación y monitoreo geotécnico; (4) gestión, fiscalización y auditorías; y (5) bioingeniería y cierre superficial. La Tabla 10 presenta la distribución estimada por etapa y los costos unitarios calculados sobre el volumen del reservorio.

Tabla 10: Costos de descaracterización por categoría para la Barragem dos Alemães.

Categoría	Costo estimado (USD)	Costo unitario (USD/m ³)
Movimiento de tierras y muro de adecuación	14 726 452	4.50
Drenaje superficial y obras complementarias	4 283 124	1.31
Instrumentación y monitoreo geotécnico	2 142 656	0.66
Gestión, fiscalización y auditorías	4 016 304	1.23
Bioingeniería y cierre superficial	1 606 831	0.49
Total	26 775 367	8.19

La Figura 3 resume la distribución porcentual de los costos, destacando la etapa de movimiento de tierras y construcción del muro de adecuación, que representa aproximadamente el 55 % del total, seguida por drenaje superficial (16 %) y gestión y fiscalización (15 %). Los costos de instrumentación (8 %) y bioingeniería (6 %) presentan proporciones menores, consistentes con la naturaleza predominantemente geotécnica y de reconfiguración geométrica del proyecto.

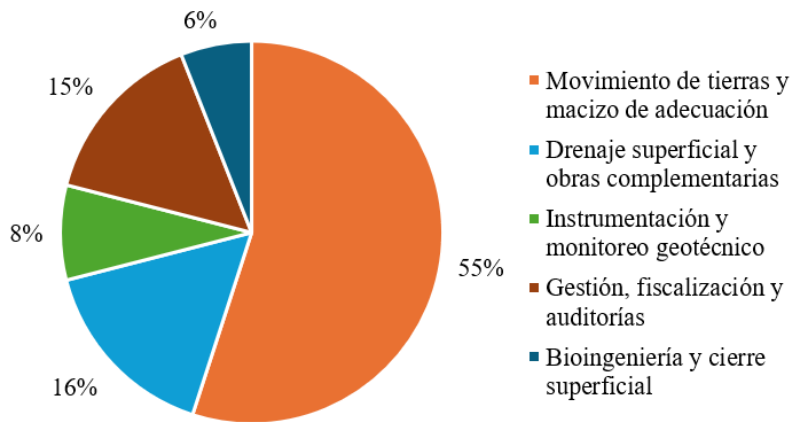


Figura 3: Distribución porcentual de costos por categoría para la Barragem dos Alemães.

En síntesis, la Barragem dos Alemães constituye un caso representativo de descaracterización de alta complejidad, en el cual la solución adoptada —basada en la construcción de un muro de adecuación aguas abajo— permitió eliminar completamente la función hidráulica de una estructura originalmente elevado aguas arriba. El proyecto cumplió con el marco regulatorio brasileño, alcanzó las condiciones de estabilidad requeridas y ofrece un referente técnico adecuado para su comparación con depósitos abandonados en Chile que presentan características constructivas y geomorfológicas similares.

5.3.4. Caso brasileiro 4: Barragem do Vigia – CSN Mineração S.A. (Ouro Preto/MG)

La Barragem do Vigia es una estructura de disposición de relaves ubicada en el Complexo Pires, en el municipio de Ouro Preto, Minas Gerais, y pertenece a CSN Mineração S.A. Su función original consistía en recibir los efluentes de la Barragem Auxiliar do Vigia (BAV) y almacenar los relaves finos del proceso de concentración de mineral de hierro. Tras el cierre operativo del reservorio en 2016, la estructura quedó sujeta a descaracterización obligatoria conforme a la Ley N° 23.291/2019 de Minas Gerais, la Ley Federal n° 14.066/2020 y la Resolución ANM N° 95/2022, dado que presentaba tipología de elevación aguas arriba (Ministério Público Federal, Ministério Público de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Agência Nacional de Mineração & CSN Mineração S.A., 2022).

Como establecen los documentos técnicos elaborados por Fonntes Geotécnica Ltda., el proyecto de descaracterización contempla la remoción completa de los diques construidos aguas arriba, la excavación parcial del reservorio, la reconfiguración geométrica y la implementación de un sistema de drenaje periférico que permita eliminar de forma definitiva la función hidráulica de la estructura (Fonntes, 2022b). En este proceso se incorporó un análisis geotécnico detallado debido a la presencia de relaves arenosos saturados en estado poco denso, condición que incrementa la susceptibilidad a fenómenos de licuefacción si las obras no se ejecutan de forma progresiva y controlada. La Nota Técnica N° 04/2022 enfatiza que, dada la fragilidad inherente de las presas aguas arriba, la secuencia constructiva debía avanzar con estricta disipación de esfuerzos y monitoreo permanente (Fonntes, 2022a).

El cronograma oficial de CSN indica que la descaracterización del sistema se desarrolló de manera secuencial, iniciando con la intervención de la BAV entre 2017 y 2021 y continuando posteriormente con la Barragem do Vigia desde agosto de 2019 hasta julio de 2023. Durante este período se ejecutaron actividades de ingeniería detallada, movilización y operación de maquinaria, excavación de relaves y del muro aguas arriba, implementación del canal periférico, instalación de bermas, conformación topográfica final y emisión del *as built* del proyecto (CSN Mineração S.A., 2023). Las obras civiles fueron desarrolladas por M. Giannetti Engenharia, mientras que Fonntes Geotécnica asumió el seguimiento técnico del proyecto de construcción, la verificación de criterios de estabilidad y el soporte técnico asociado a la ejecución.

El volumen remanente del reservorio al inicio del proyecto correspondía a aproximadamente 456.000 m³, valor recogido en los documentos ambientales y técnicos más recientes de CSN Mineração y adoptado para el cálculo de los costos unitarios.

En términos de fiscalización y control, el proceso incorporó auditorías externas de seguridad de presas, evaluaciones periódicas de desempeño (EDR), monitoreo hídrico mensual e inspecciones estructurales continuas. La trazabilidad financiera se evidencia en los informes trimestrales entre 2022 y 2024, los cuales detallan la certificación de obras, pagos mensuales mediante SAP y la progresión del contrato principal de descaracterización.

El costo total ejecutado asciende a 8,58 millones de USD y el costo unitario final de la intervención corresponde a 18,82 USD/m³, un valor elevado en comparación con otras estructuras brasileñas, lo cual se explica por el volumen intervenido, la complejidad geométrica del reservorio y las restricciones geotécnicas asociadas a la ejecución segura de la obra. Para efectos comparativos, y siguiendo la misma metodología utilizada en los casos anteriores, los costos se agrupan en cinco categorías: maquinaria y

movimiento de tierra, auditoría externa, revegetación, gestión y control, y monitoreo, los detalles de costos por categoría se observan en la Tabla 11.

Tabla 11: Costos de descaracterización por categoría para la Barragem do Vigia.

Categoría	Costo total (USD)	Costo unitario (USD/m ³)
Maquinaria y movimiento de tierra	7 732 210	16.96
Auditoría externa	283 327	0.62
Revegetación	532 614	1.17
Gestión y control	25 440	0.06
Monitoreo hídrico mensual	8 484	0.02
Total	8 582 075	18.82

Nota: El costo unitario se calcula sobre un volumen de 456.000 m³.

La primera categoría domina ampliamente el presupuesto, alcanzando 7,73 millones de USD (aproximadamente el 90 % del costo total), lo que refleja la magnitud del movimiento de material y de la remoción del muro aguas arriba. La revegetación representa cerca del 6 %, la auditoría externa en torno al 3,3 %, la gestión y control el 0,3 % y el monitoreo hídrico mensual apenas el 0,1 %, conformando un perfil económico coherente con la naturaleza intensiva en movimiento de tierras de este tipo de proyectos, esto se ve representado en la .

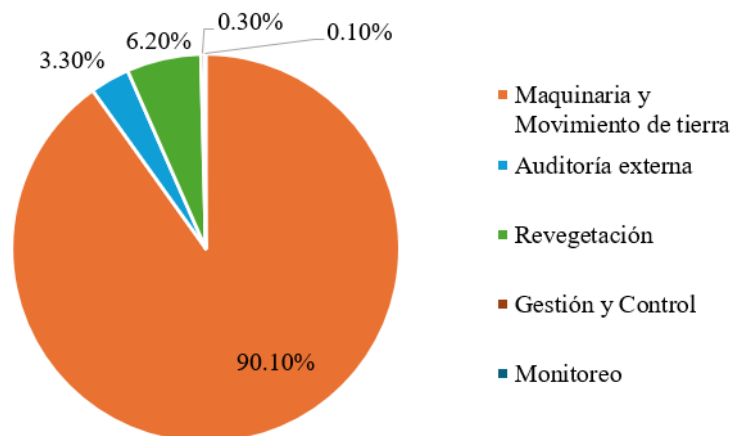


Figura 4: Distribución porcentual de los costos de descaracterización de la Barragem do Vigia por categoría.

En conjunto, la Barragem do Vigia constituye un caso representativo de descaracterización de una estructura a aguas arriba en un complejo minero de gran escala. El proyecto cumplió con la normativa vigente, incorporó monitoreo técnico constante y permitió transformar una estructura potencialmente inestable en una pila de relaves estabilizada, sin función hidráulica, lo que la convierte en un referente útil para la comparación con depósitos chilenos abandonados o activos que presenten condiciones constructivas similares.

5.3.5. Caso brasileño 5: Barragem Central – SAFM Mineração Ltda. (Itabirito/MG)

La Barragem Central corresponde a una estructura de disposición de sedimentos ubicada en el municipio de Itabirito, estado de Minas Gerais (Brasil), y pertenece a SAFM Mineração Ltda. Tras la entrada en vigencia de la Resolução ANM N° 95/2022, que establece la eliminación obligatoria de presas construidas por el método de aguas arriba, la estructura fue incorporada al programa formal de descaracterización supervisado por la Agência Nacional de Mineração y otros órganos fiscalizadores.

De acuerdo con los levantamientos topográficos y controles volumétricos realizados durante la etapa inicial, el volumen remanente del reservorio correspondía a aproximadamente 423.000 m³. A partir de esta caracterización se definió un plan de trabajo secuencial que contempló actividades de preparación del sitio, movilización de equipos, monitoreo técnico, remoción de material, drenaje y estabilización geomorfológica. La intervención se desarrolló entre 2022 y 2025, alcanzando finalmente la eliminación completa de la función hidráulica de la estructura y su reclasificación como área estable desde el punto de vista geotécnico y ambiental (Ministério Público do Estado de Minas Gerais et al., 2022).

La fase operativa se centró en la remoción y transporte del material almacenado, su traslado a la Pilha Noroeste (Pilha NW) y su posterior compactación conforme a los criterios definidos en el proyecto ejecutivo. Para ello se emplearon camiones de extracción, excavadoras, tractores, camiones aljibe y compactadores tipo *pata de cabra*. Estas actividades representaron el componente económico más significativo del proceso, concentrando cerca del 78 % del costo total, lo cual es coherente con la naturaleza altamente mecanizada de la descaracterización en estructuras de porte intermedio (SAFM Mineração Ltda., 2025b).

El proyecto incluyó además la implementación de obras complementarias de drenaje para el período lluvioso, la actualización de la mancha de ruptura hipotética y la ejecución de labores de conformación superficial y revegetación de taludes. Paralelamente, se mantuvo un programa permanente de monitoreo técnico, que incorporó levantamientos topográficos, certificación de volúmenes removidos y acompañamiento independiente, en conformidad con los requisitos regulatorios (SAFM Mineração Ltda., 2022a).

Los costos consolidados del proceso se agrupan en siete categorías técnicas, cuyo detalle se presenta en la Tabla 12. La tabla muestra los costos totales en USD y su correspondiente costo unitario por metro cúbico, calculado en función del volumen remanente de la estructura. La Figura 5 presenta la distribución porcentual por categoría, destacándose la fuerte dominancia de la operación mecánica en terreno.

Tabla 12: Costos de descaracterización por categoría para la Barragem Central.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m ³)
Personal y equipos técnicos	461 909	1.09
Movimiento de tierra	8 080 804	19.10
Monitoreo	245 488	0.58
Sistema de drenaje	262 884	0.62
Gestión y control	67 599	0.16
Revegetación y seguridad ambiental	533 304	1.26
Mantenimiento general	711 386	1.68
Total	10 363 374	24.50

Como se observa en la Figura 5, la categoría movimiento de tierra representa cerca del 78 % del presupuesto total, seguida por mantenimiento general (6,86 %) y revegetación (5,15 %). Las categorías restantes presentan proporciones significativamente menores, lo que evidencia la importancia del movimiento de material y de la logística operativa en proyectos de descaracterización de este tipo.

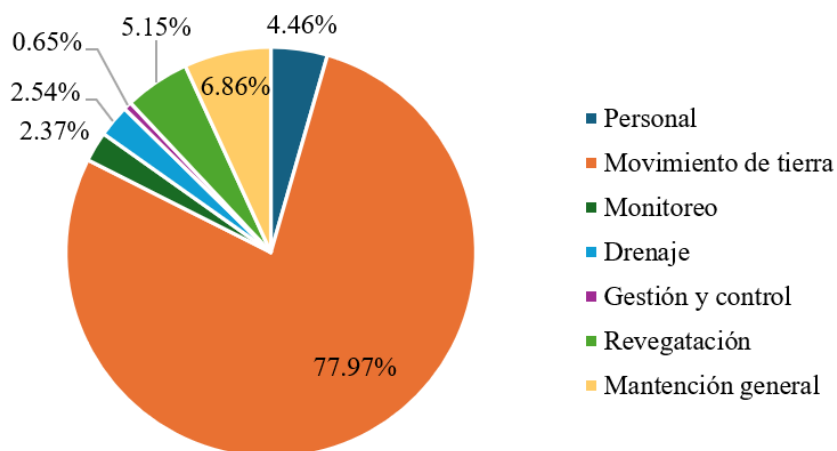


Figura 5: Distribución porcentual de los costos de descaracterización de la Barragem Central por categoría.

En su conjunto, la Barragem Central constituye un caso representativo de descaracterización en estructuras de porte intermedio, donde la mayor parte de los recursos se destina a actividades de remoción, transporte y compactación de material. El proyecto cumplió con las exigencias regulatorias brasileñas, incorporó monitoreo técnico permanente y aplicó criterios de estabilidad ambiental y de seguridad estructural acordes con las buenas prácticas internacionales en cierre de instalaciones mineras. Su análisis resulta fundamental para la comparación con depósitos de relaves chilenos que presentan magnitudes, condiciones geotécnicas y restricciones operacionales similares.

5.3.6. Resumen casos estudiados de Brasil

A continuación, se presenta una tabla resumen que sintetiza los principales resultados obtenidos del análisis técnico-económico de los cinco depósitos brasileños completamente descaracterizados estudiados en esta investigación. Esta comparación incluye el volumen intervenido, el costo total ejecutado, el costo unitario por metro cúbico y las obras más relevantes desarrolladas en cada caso, permitiendo contextualizar las diferencias metodológicas, operativas y financieras entre los proyectos y proporcionando una base homogénea para la posterior comparación con los depósitos chilenos

Tabla 13: Depósitos brasileños completamente descaracterizados analizados en este estudio.

Depósito	Empresa	Estado / municipio	Mineral	Volumen (m ³)	Costo total (USD)	Costo unitario (USD/m ³)
B1 – Itaminas	Itaminas Mineração S.A.	MG / Sarzedo	Hierro	817 700	5 373 281	6.57
Barragem de Arêdes	SAFM Mineração Ltda.	MG / Itabirito	Hierro	417 000	6 697 822	16.06
Barragem dos Alemães	Gerdau Açominas S.A.	MG / Ouro Preto	Hierro	3 270 000	26 775 367	8.19
Barragem do Vigia	CSN Mineração S.A.	MG / Ouro Preto	Hierro	456 000	8 582 075	18.82
Barragem Central	SAFM Mineração Ltda.	MG / Itabirito	Hierro	423 000	10 363 374	24.50

Los depósitos completamente descaracterizados en Brasil presentan intervenciones diversas, pero mantienen patrones comunes asociados a la geometría original de los depósitos, su nivel de riesgo y las condiciones locales. En el caso de *B1-Itaminas*, las obras incluyeron el drenaje y manejo de aguas, la remoción del muro aguas arriba, la construcción de un nuevo muro aguas abajo y la instalación de coberturas superficiales, junto con labores de revegetación y monitoreo geotécnico permanente. Por su parte, *Barragem de Arêdes* consideró la remoción total del material del embalse, su transporte y compactación en la Pilha Noroeste, además de la ejecución de obras de drenaje, reconformación geomorfológica, revegetación y control técnico.

En *Barragem dos Alemães*, el proceso contempló la construcción de un muro de adecuación aguas abajo, un movimiento de tierras significativo, la instalación de sistemas de drenaje interno y superficial, instrumentación geotécnica y la aplicación de técnicas de bioingeniería para el cierre superficial. A su vez, *Barragem do Vigia* incluyó la remoción de diques aguas arriba y parte de los relaves, la reconformación geométrica del reservorio, la implementación de un canal periférico de drenaje, bermas de estabilidad y trabajos de revegetación, junto con un monitoreo hídrico continuo. Finalmente, en *Barragem Central*, las actividades principales consistieron en la remoción y transporte de sedimentos hacia la Pilha Noroeste, la compactación y control de calidad, la instalación de drenaje para períodos lluviosos, la conformación superficial, revegetación y el monitoreo topográfico permanente.

Con el fin de establecer una base comparativa homogénea entre los distintos casos brasileños analizados, las actividades reportadas en cada proyecto fueron reclasificadas y normalizadas en siete ítems técnicos fundamentales para un proceso de descaracterización: (1) maquinaria y movimiento de tierra, (2) monitoreo e instrumentación, (3) drenaje y manejo de aguas, (4) personal, (5) revegetación, (6) gestión y control, y (7) mantención. Esta agrupación permite capturar de manera consistente las funciones operativas comunes a proyectos de naturaleza similar, independientemente de su escala, método constructivo o condición geotécnica inicial.

A partir de esta clasificación, se calcularon los costos unitarios por metro cúbico para cada caso, considerando los volúmenes efectivamente intervenidos y los costos ejecutados informados en los documentos oficiales. Posteriormente, dichos valores fueron promediados con el objetivo de obtener

una estimación representativa del costo unitario asociado a cada categoría técnica, lo cual constituye un parámetro de referencia para la comparación con los depósitos chilenos y para la evaluación preliminar de escenarios de descaracterización en contextos análogos.

Tabla 14: Promedio de costos unitarios por categoría.

Servicio	Promedio costo unitario (USD/m³)
Maquinaria y Movimiento de tierra	12.74
Monitoreo e instrumentación	0.41
Drenaje y manejo de aguas	0.72
Personal	1.06
Revegetación	1.03
Gestión y Control	0.50
Mantención	1.85
Total	18.31

5.4. Resultados ambientales y sociales de los casos brasileños

5.4.1. Caso brasileño 1: Barragem B1 – Itaminas Mineração S.A. (Sarzedo/MG)

La evaluación conjunta de los componentes ambientales y sociales del caso B1 evidencia que la descaracterización de esta estructura presenta un escenario de baja sensibilidad territorial y de impactos controlables. Las obras, clasificadas como de pequeño porte y de corta duración, se ejecutan íntegramente dentro del área operacional de la mina, lo que reduce significativamente su interacción con el entorno físico y social inmediato. Esta condición permite que los efectos ambientales y las molestias sociales asociadas se mantengan en niveles bajos y dentro de los parámetros esperados para este tipo de intervención.

En el ámbito ambiental, los estudios identifican alteraciones temporales en la calidad del aire, derivadas de emisiones fugitivas de polvo, y aumentos puntuales en el nivel de presión sonora debido a la operación de maquinaria. Ambos impactos se consideran de baja intensidad y reversibilidad inmediata, y se encuentran bajo la gestión de programas ya implementados en la operación, como el control de emisiones atmosféricas y el monitoreo de ruido. Asimismo, se registran efectos sobre la calidad de las aguas superficiales, principalmente por erosión localizada y arrastre de sedimentos hacia puntos de monitoreo como la bacia de clarificação y el Córrego Boa Esperança, los cuales son controlados mediante el Programa de Monitoramento de Águas Superficiais. Estos impactos se mantienen dentro de las expectativas y no representan riesgos significativos para los cuerpos de agua (Itaminas Comércio de Minérios S.A., 2022a).

El medio biótico tampoco presenta presiones relevantes, ya que no existe expansión del área intervenida ni supresión significativa de vegetación nativa. Por el contrario, los informes señalan la ocurrencia de efectos positivos después de la intervención, incluyendo mejoras en la conectividad y en la disponibilidad de hábitat para la fauna local, particularmente herpetofauna, avifauna y mastofauna. La gestión ambiental se complementa con un sistema robusto de manejo de residuos que asegura su correcta destinación conforme a la normativa estatal.

En el ámbito social, el caso B1 presenta impactos igualmente reducidos. Los documentos técnicos confirman que no fue necesaria la remoción de personas residentes dentro de la zona potencial de inundación, lo que elimina la presencia de uno de los impactos sociales más severos asociados históricamente a este tipo de estructuras. Las afectaciones registradas se concentran en molestias temporales como ruido, polvo y tránsito operativo, las cuales afectan principalmente la percepción de confort de la población y se consideran de baja intensidad y totalmente reversibles al finalizar las actividades. El principal aspecto social destacado es la percepción de riesgo de las comunidades dentro de la Zona de Autossalvamento (ZAS)², que se mitiga mediante el Programa de educación e información ambiental, orientado a entregar información clara y continua sobre la seguridad estructural, el monitoreo y las etapas de obra, fortaleciendo así la confianza y la comunicación con la comunidad (Itaminas Comércio de Minérios S.A., 2022b).

En conjunto, los resultados ambientales y sociales de B1 muestran que la descaracterización se desarrolla en un contexto de baja complejidad, con impactos temporales, mitigables y bien gestionados, tanto por las condiciones de localización de la estructura como por los programas ambientales y sociales implementados. El caso se configura como un ejemplo de intervención controlada, con efectos acotados sobre el territorio y una adecuada articulación entre gestión ambiental y comunicación comunitaria.

5.4.2. Caso 2: Barragem de Arêdes (SAFM Mineração)

La evaluación integrada del caso Arêdes muestra un escenario de complejidad moderada, caracterizado por impactos ambientales acotados y un contexto social de baja sensibilidad directa debido a la ausencia de población residente dentro de la Zona de Autossalvamento (ZAS) y de la zona potencial de inundación asociada a la estructura. Este factor territorial reduce significativamente la magnitud de los impactos sociales típicamente observados en proyectos de descaracterización de barreras construidas aguas arriba, permitiendo que las intervenciones se concentren principalmente en la mitigación ambiental y en acciones de educación dirigidas a comunidades vecinas, especialmente la comunidad de Ribeirão do Eixo.

En el ámbito ambiental, las actividades de descaracterización generan alteraciones físicas vinculadas a la remoción del muro, cambios en el relieve, movimiento de tierra y reconfiguración de drenajes. El informe de evaluación de impactos identifica riesgos de erosión, sedimentación y transporte de sedimentos hacia cuerpos hídricos locales, los cuales son considerados previsibles y mitigables mediante sistemas de drenaje, estabilización de taludes y monitoreo sistemático de turbidez y sólidos en suspensión. La calidad del aire se ve puntualmente afectada por emisiones de partículas asociadas a la maquinaria y al tránsito operativo, aunque la empresa mantiene un plano anual de medidas de mitigación de material particulado para cumplir con las condicionantes ambientales ya vigentes. El nivel de ruido es monitoreado de manera regular, y aun cuando la mina se sitúa próxima a otros complejos mineros que pueden influir en las mediciones, los niveles registrados permanecen dentro de rangos manejables.

Respecto al medio biótico, el estudio identifica vegetación nativa y fauna con distribución diversificada en el entorno de la mina Ponto Verde. Para evaluar adecuadamente los efectos sobre la fauna, se implementa un programa de monitoreo basado en áreas de experimento y de control, lo

²Zona de Autossalvamento; corresponde al área aguas abajo donde el tiempo de respuesta es insuficiente para una evacuación asistida por autoridades, por lo que la autoprotección depende de la población local.

que permite detectar variaciones en riqueza, abundancia y diversidad de especies de herpetofauna, avifauna, mastofauna e ictiofauna en distintas fases del proyecto. Aunque existe supresión localizada de vegetación y perturbación temporal de hábitats, los impactos se consideran reversibles y se encuentran acompañados por un Plan de Recuperación de Áreas Degradadas que contempla revegetación con especies nativas, control de erosión y seguimiento ecológico (SAFM Mineração Ltda., 2023).

En el ámbito social, la ausencia de población directamente expuesta al riesgo de inundación reduce sustancialmente la posibilidad de impactos sociales severos. No obstante, el proyecto mantiene obligaciones sociales definidas en el Termo de Compromisso firmado con el Ministerio Público y la FEAM, las cuales requieren acciones de educación ambiental y comunicación sistemática con comunidades del entorno. El PEIA identifica como público relevante tanto a los trabajadores propios y tercerizados como a la comunidad de Ribeirão do Eixo, localizada aguas abajo del emprendimiento. Aunque esta comunidad no se sitúa dentro de la zona de riesgo directo, presenta necesidades específicas de información relacionadas con el proceso de descaracterización y con las garantías de seguridad implementadas.

El Diagnóstico Rápido Participativo aplicado durante la elaboración del PEIA evidenció baja adhesión comunitaria y desconocimiento generalizado sobre el proceso de cierre de la estructura, aspectos que impulsaron revisiones en las estrategias de comunicación y en el diseño de actividades educativas (Mineração, 2023). El programa incluye palestras educativas, uso de materiales audiovisuales, actividades participativas, campañas informativas y visitas guiadas orientadas a fortalecer el vínculo entre la empresa y la comunidad, aclarar dudas sobre los controles ambientales y reforzar la comprensión sobre la seguridad estructural (SAFM Mineração Ltda., 2022b).

En conjunto, el caso Aredes presenta un perfil ambiental manejable y un escenario social de baja exposición directa, pero que requiere esfuerzos continuos de comunicación y educación. Los impactos identificados son fundamentalmente temporales, mitigables y acompañados por programas formales de monitoreo ambiental y estrategias de diálogo comunitario. La combinación de gestión técnica rigurosa y fortalecimiento progresivo del relacionamiento social permite que la descaracterización avance de manera segura, transparente y con estabilidad territorial.

5.4.3. Caso 3: Barragem dos Alemães – Gerdau Açominas S.A. (Ouro Preto/MG)

La evaluación integrada de los componentes ambientales y sociales del caso Dos Alemães muestra un escenario más complejo que el observado en B1, debido principalmente a la presencia de comunidades rurales y urbanas dentro de la zona de autossalvamento y a la existencia de edificaciones localizadas en la zona potencial de inundación, elementos que incrementan la sensibilidad territorial frente a las obras de descaracterización. Los impactos identificados se mantienen, sin embargo, dentro de rangos temporales y mitigables, según los estudios técnicos oficiales y el parecer socioambiental independiente.

En el ámbito ambiental, las obras generan alteraciones físicas vinculadas con la modificación del relieve, la remoción del muro, la intervención en drenajes y el movimiento de tierra, lo que produce riesgos de erosión y arrastre de sedimentos hacia cursos de agua aguas abajo. El informe de impactos ambientales clasifica estos efectos como de baja a media magnitud y señala que son mitigables mediante canaletas, dissipadores de energía, control de taludes y monitoreo sistemático de turbidez y sólidos en suspensión. La calidad del aire también se ve temporalmente afectada por la generación

de polvo asociada al tránsito de maquinaria, especialmente en los accesos rurales próximos a las comunidades de Mota y Miguel Burnier, aunque el impacto se mantiene acotado gracias a medidas de riego, limitaciones de velocidad y mantenimiento de equipos. El aumento de ruido derivado de las actividades operativas es perceptible en zonas habitadas, pero se considera reversible y manejable mediante restricciones horarias y señalización apropiada.

En el medio biótico, los informes identifican la presencia de vegetación nativa y fragmentos de bosque atlántico que pueden verse afectados por la supresión puntual de vegetación y la movilización temporal de fauna. No obstante, estos impactos se clasifican como reversibles debido a que el proyecto contempla un Plan de Recuperación de Áreas Degradadas que considera revegetación con especies nativas, control de erosión y monitoreo de flora y fauna. El parecer técnico independiente confirma que los procedimientos de rescate y manejo de fauna cumplen con la normativa, siempre que la empresa mantenga registros adecuados y seguimiento continuo durante la fase de obra (Gerdau Açominas S.A., 2022b) .

En el ámbito social, Dos Alemães presenta un nivel de sensibilidad considerablemente mayor que B1, dado que existen viviendas en la zona de autossalvamento y edificaciones dentro de la zona potencial de inundación. El diagnóstico del proyecto de educación ambiental señala que una parte importante de la población percibe impactos ambientales negativos o molestias asociadas al polvo, el ruido y el tránsito pesado (Gerdau Açominas S.A., 2022d). La pesquisa aplicada a 1.840 registros muestra que cerca de un tercio de los encuestados identifica impactos ambientales o afectaciones a la calidad de vida, mientras que aproximadamente el 75 % declara desconocer las medidas de mitigación aplicadas, lo que aumenta la ansiedad y la necesidad de información clara (Statum Geotecnia Ltda., 2022).

El tránsito de maquinaria en caminos rurales afecta la movilidad y genera molestias para residentes de núcleos como Mota y Miguel Burnier. Estos impactos son temporales y mitigables mediante señalización, control de velocidades y comunicación directa con las comunidades, tal como lo refuerza el parecer técnico independiente. A pesar de ello, los documentos también reconocen efectos positivos, como la generación de empleo local temporal y la mejora en seguridad a largo plazo derivada de la eliminación de una estructura aguas arriba.

Para abordar la percepción de riesgo y las inquietudes ambientales, se implementa un amplio Programa de Educación Ambiental, que considera acciones presenciales, divulgación en radio y prensa local, actividades escolares y material educativo orientado a diferentes rangos etarios. El parecer independiente enfatiza que este programa debe ejecutarse de forma continua y documentada, a fin de sostener la confianza comunitaria y evitar la propagación de información incompleta o distorsionada (Gerdau Açominas S.A., 2022e) .

En síntesis, el caso Dos Alemães configura un territorio socialmente sensible y ambientalmente complejo, en el que los impactos físicos y biológicos permanecen dentro de rangos previsibles y mitigables, pero donde la percepción comunitaria y la necesidad de información requieren atención constante. El equilibrio entre medidas ambientales rigurosas y estrategias de comunicación activa es esencial para asegurar que la descaracterización avance con estabilidad y confianza por parte de las comunidades involucradas.

5.4.4. Caso brasileño 4: Barragem do Vigia – CSN Mineração S.A. (Ouro Preto/MG)

La evaluación integrada del caso Vigia evidencia un escenario socioambiental más sensible que en otros depósitos analizados, debido a la proximidad del subdistrito de Mota y del barrio Pires, donde existe población expuesta a molestias derivadas de actividades mineras históricas y de otras unidades productivas del entorno. Sin embargo, los documentos oficiales indican que la Barragem do Vigia se encuentra en Nivel 1 de emergencia, lo que significa que no existe necesidad de desocupar viviendas aguas abajo, ya que el escenario hipotético de ruptura está siendo tratado exclusivamente en el Plan de Atención a Emergencias y no constituye un impacto asociado a las actividades de descaracterización.

Desde el punto de vista ambiental, las actividades de descaracterización generan impactos previsibles sobre el medio físico. El Relatorio de Impacto Ambiental identifica alteraciones en el suelo relacionadas con la generación de residuos sólidos, efluentes sanitarios y aceitosos, con potencial de modificar su calidad si no son manejados adecuadamente. También se destacan riesgos de erosión y arrastre de sedimentos, con posibles efectos sobre los cuerpos hídricos de la cuenca del arroyo Vigia. Estos impactos son prevenibles mediante sistemas de drenaje, estabilización de taludes y controles establecidos en los programas ambientales del proyecto.

En relación con la fauna, el informe señala que el tránsito de vehículos pesados puede provocar ahuyentamiento, perturbación sonora y atropellos, afectando especialmente a especies sensibles como anfibios, reptiles y pequeños mamíferos. El impacto es clasificado como de intensidad media, duración temporal y parcialmente reversible, mitigado mediante acciones como control de velocidad, señalización ambiental, mantenimiento preventivo de vehículos y programas específicos de manejo de fauna.

La calidad del aire y el ruido constituyen aspectos relevantes en la evaluación socioambiental. Según el RIA, la población local ya convive con alteraciones significativas derivadas de otras actividades mineras y del intenso tráfico de la BR-040, de modo que impactos adicionales de polvo y ruido asociados a la descaracterización pueden amplificar molestias preexistentes, especialmente durante el transporte de equipos, materiales y mano de obra. Aunque temporales, dichos impactos repercuten fuertemente en la percepción social debido al prolongado historial de exposición (CSN Mineração S.A., 2022c).

En el ámbito social, el Proyecto de Educación e Información Ambiental (PEIA) describe un territorio que demanda información clara y continua, donde la población inserta en el área de influencia directa necesita comprender los riesgos, las etapas de la obra y las medidas de control ambiental adoptadas. Elaborado en cumplimiento del Término de Compromiso firmado con la autoridad ambiental y basado en la Deliberación Normativa COPAM N° 214/2017, el PEIA integra acciones educativas dirigidas a trabajadores y comunidades de las zonas de influencia directa e indirecta (ZAS y ZSS), incluyendo charlas, materiales informativos, procesos participativos y actividades de sensibilización socioambiental (CSN Mineração S.A., 2022a). Este programa desempeña un papel esencial en la reducción de la percepción de riesgo y en la promoción de la confianza comunitaria.

El RIA refuerza esta necesidad al mencionar que los residentes de Mota y Pires conviven hace más de una década con problemas de ruido, polvo y tránsito derivados del conjunto de emprendimientos mineros presentes en la región, lo que explica su sensibilidad a nuevas intervenciones y la importancia de medidas continuas de comunicación y control. En este contexto, la ejecución del PEIA se vuelve

fundamental para asegurar participación informada, transparencia y fortalecimiento del diálogo social.

En síntesis, el caso Vigia presenta impactos ambientales temporales y mitigables, resultantes principalmente de la intervención física en la estructura, el tránsito de maquinaria y la movilización de materiales. Aunque no existe población en riesgo directo por inundación, la sensibilidad social es elevada debido al historial de convivencia con múltiples fuentes de perturbación ambiental. Por ello, la descaracterización requiere equilibrar un control ambiental riguroso, una adecuada gestión territorial y una comunicación activa con las comunidades vecinas, garantizando que la intervención avance de forma segura, previsible y socialmente legitimada.

5.4.5. Caso brasileño 5: Barragem Central – SAFM Mineração Ltda. (Itabirito/MG)

La evaluación integrada del caso Barragem Central muestra un escenario de impactos controlados y de baja sensibilidad social, en el cual las principales demandas se concentran en la gestión ambiental, la estabilidad de la estructura y la comunicación con las comunidades vecinas. El informe de impactos ambientales caracteriza la barrera como una estructura de contención de residuos industriales con un volumen aproximado de 423.000 m³, compuesta por residuos clasificados como Clase IIA no inertes, y señala que presenta un potencial de daño ambiental medio y un nivel de riesgo bajo, parámetros que orientan la naturaleza y magnitud de los impactos previstos durante el proceso de descaracterización.

Desde el punto de vista ambiental, las actividades de descaracterización generan alteraciones físicas asociadas al movimiento de tierra, la reconfiguración del muro, la adecuación de los sistemas de drenaje y la remoción de materiales. El informe identifica la posibilidad de erosión, arrastre de sedimentos y modificaciones en la calidad de los cuerpos hídricos, impactos considerados previsible y mitigables mediante el conjunto de acciones estructuradas en el *Programa de Gestión Ambiental* (PGA). Entre estas acciones se incluyen el drenaje superficial, la estabilización de taludes, el monitoreo hidrológico y el control sistemático de parámetros como turbidez, pH y sólidos en suspensión, comparados con límites normativos establecidos. Asimismo, se mencionan emisiones temporales de material particulado y ruido derivadas del tránsito de maquinaria, cuyos efectos se mantienen controlados gracias a medidas operacionales y al monitoreo permanente de la calidad del aire y de los niveles sonoros.

En relación con el medio biótico, el informe señala la presencia de vegetación nativa y de fauna adaptada al entorno rural–minero. Pueden ocurrir impactos puntuales sobre hábitats locales debido al tránsito de maquinaria y a la intervención física en la zona de obra; sin embargo, tales impactos se consideran reversibles, ya que el proyecto contempla medidas de recuperación ambiental por medio del PRAD, incluyendo revegetación con especies nativas, control de erosión y monitoreo ecológico. En conjunto, la dimensión ambiental del caso evidencia un contexto controlable, con impactos temporales, mitigables y dependientes de la ejecución rigurosa de los programas estructurados en el PGA (CSN Mineração S.A., 2022d) .

En el ámbito social, el *Proyecto de Educación e Información Ambiental* (PEIA) señala que no existe población residente dentro de la Zona de Autossalvamento (ZAS) ni dentro de la zona potencial de inundación asociadas a la estructura, lo que elimina la posibilidad de impactos sociales severos y la necesidad de remoción o protección directa de viviendas (CSN Mineração S.A., 2022b) . A pesar de ello, se mantienen obligaciones socioambientales definidas en el acuerdo de compromiso firmado entre la empresa, el Ministerio Público y los órganos ambientales, que exigen la implementación de

un programa educativo orientado tanto al público interno como a las comunidades del entorno, con el fin de ampliar la comprensión sobre la actividad minera, los controles ambientales y el proceso de descaracterización (Ministério Público Federal, Ministério Público de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Agência Nacional de Mineração & SAFM Mineração Ltda., 2022) .

El PEIA identifica a la comunidad de Ribeirão do Eixo como el público externo prioritario por su ubicación aguas abajo del emprendimiento. Aunque esta comunidad no está expuesta directamente a riesgos de inundación, presenta necesidades específicas de información sobre seguridad estructural, monitoreo ambiental y avance de las etapas de obra. El diagnóstico participativo realizado en el marco del PEIA evidenció baja adhesión inicial y la necesidad de reforzar las estrategias de comunicación, lo que orientó la adopción de metodologías participativas, actividades presenciales, materiales educativos, visitas guiadas y canales permanentes de diálogo entre la empresa y la comunidad. El programa también contempla acciones destinadas a trabajadores directos y contratistas, garantizando que todos comprendan sus responsabilidades socioambientales.

En síntesis, la Barragem Central presenta un escenario socioambiental de baja exposición directa, aunque dependiente de una gestión ambiental robusta y de una comunicación constante con la comunidad local. Los impactos ambientales son temporales y mitigables, especialmente aquellos relacionados con drenaje, calidad del agua, material particulado y ruido. En la dimensión social, la ausencia de población directamente expuesta al riesgo permite concentrar los esfuerzos en educación, transparencia y fortalecimiento del relacionamiento comunitario. La integración entre el PGA y el PEIA proporciona las condiciones necesarias para que la descaracterización avance de manera segura, controlada y socialmente responsable.

5.5. Resultados de los casos chilenos

A continuación, se presentan las fichas técnicas de cada uno de los casos seleccionados para el análisis en Chile, junto con los resultados obtenidos. Estos depósitos corresponden a las instalaciones de mayor volumen identificadas dentro de las regiones y comunas con mayor concentración de depósitos de relaves abandonados construidos mediante el método de aguas arriba. La caracterización preliminar de cada sitio consideró aspectos territoriales, ambientales y operacionales relevantes para la posterior estimación de costos del proceso de descaracterización.

5.5.1. Depósito Flora 1 (Andacollo)

El depósito de relaves Flora 1 corresponde a un tranque de relaves de aguas arriba, ubicado en el área urbana de Andacollo, Región de Coquimbo, con un volumen estimado de 225 000 m³. El depósito se emplaza en un entorno de topografía quebrada, con cercanía inmediata a viviendas, infraestructura vial local y cursos de agua de carácter intermitente, lo que incrementa su nivel de exposición socioambiental.

El depósito se emplaza en un entorno urbano–periurbano, con presencia de viviendas, infraestructura vial local y equipamiento urbano en su entorno inmediato, lo que incrementa su nivel de exposición social y ambiental.

Desde el punto de vista físico, el depósito presenta una geometría de baja altura relativa y una superficie expuesta sin cobertura vegetal, característica común de relaves abandonados en zonas semiáridas. Las condiciones climáticas de la zona, caracterizadas por baja precipitación anual y alta generación de polvo, refuerzan la necesidad de una intervención orientada a mitigar la dispersión de material particulado y controlar escurrimientos superficiales eventuales. En la Tabla 15 se presenta el resumen técnico del depósito.

Dada su localización dentro del área urbana de Andacollo, la evaluación de alternativas de descaracterización para el depósito Flora 1 debe considerar no solo criterios técnicos y económicos, sino también aspectos territoriales, ambientales y sociales, en concordancia con los enfoques de gestión de pasivos mineros revisados en la literatura y en experiencias internacionales (Agência Nacional de Mineração, 2019).

Tabla 15: Ficha técnica del depósito Flora 1 (Andacollo).

Variable	Descripción
Volumen estimado (m ³)	225 000
Tipo de instalación	Tranque de relaves de aguas arriba
Localización	Andacollo, Región de Coquimbo
Coordenadas	30.226054°S, 71.086541°O
Altitud aproximada	1 000–1 100 m s.n.m.
Proximidad a cursos de agua	Quebradas y cauces intermitentes
Infraestructura cercana	Faenas mineras, caminos mineros y ruta a Coquimbo
Condiciones ambientales	Clima semiárido de altura, alta generación de polvo

Datos de entrada y supuestos generales

Para la ejecución de las alternativas de descaracterización del depósito Flora 1 se consideró una flota de equipos acorde a la escala del depósito, su emplazamiento urbano–minero y la necesidad de controlar adecuadamente los impactos ambientales durante la ejecución. El dimensionamiento de la maquinaria se realizó buscando un equilibrio entre continuidad operacional, control de emisiones de polvo y minimización de interferencias con el entorno inmediato.

En ambas alternativas se considera la operación en un único frente principal de trabajo, dado el volumen relativamente acotado del depósito y la cercanía a áreas habitadas, lo que hace recomendable evitar una sobreconcentración de equipos operando simultáneamente.

La maquinaria considerada para el proyecto corresponde a:

- **Excavadora hidráulica:** se contempla el uso de una excavadora hidráulica como equipo principal de remoción y redistribución del material. Este equipo cumple un rol central tanto en la reconformación geomorfológica del depósito como en la excavación del material en el caso de la alternativa de remoción total. La selección de una única unidad se justifica por el volumen del depósito y por la necesidad de mantener un control preciso de las operaciones en un entorno urbano.
- **Camiones tolva:** para el manejo y transporte del material se considera una flota de dos camiones tolva, los cuales operan de manera coordinada con la excavadora. En la alternativa

de reconfiguración *in situ*, estos equipos se utilizan principalmente para el traslado interno del material dentro del depósito, mientras que en la alternativa de remoción total cumplen un rol fundamental en el transporte hacia la faena receptora externa. El número de camiones se define de manera conservadora, evitando congestión en los accesos y reduciendo impactos por tránsito.

- **Cargador frontal:** se considera un cargador frontal destinado a labores de apoyo, tales como nivelación fina, conformación de superficies, manejo de material de cobertura y apoyo a las etapas finales de cierre y revegetación. Este equipo permite aumentar la eficiencia en las fases no directamente asociadas a la excavación principal.
- **Equipos auxiliares y de apoyo:** adicionalmente, se contempla el uso de equipos menores de apoyo, tales como camiones aljibe para control de polvo, equipos livianos para inspección y supervisión, y maquinaria menor para la ejecución de obras de drenaje superficial y terminaciones.

El dimensionamiento de la maquinaria responde a la escala del depósito Flora 1 y a la experiencia observada en procesos de descaracterización de depósitos de volumen similar documentados en Brasil, donde se prioriza el uso de flotas reducidas con altos niveles de control operacional, permitiendo una ejecución progresiva y segura de las actividades.

Asimismo, la selección de una flota acotada resulta coherente con la necesidad de minimizar impactos ambientales y sociales, particularmente en lo relativo a emisiones de polvo, ruido y tránsito de equipos pesados en sectores cercanos a áreas habitadas.

Alternativa 1: Reconfiguración *in situ*

La alternativa de reconfiguración *in situ* tiene como objetivo eliminar la condición de tranque de relaves sin remover el material fuera del sitio, mediante la redistribución interna del relave y la transformación del depósito en una masa geomorfológicamente estable. Esta alternativa busca reducir el riesgo asociado al pasivo, minimizando a su vez los impactos logísticos y ambientales derivados del transporte externo.

Este enfoque es coherente con experiencias observadas en Brasil, donde para depósitos de menor volumen o con restricciones logísticas se optó por soluciones de descaracterización que priorizan la estabilidad física final y el control ambiental, sin recurrir a la remoción total del material.

Criterios técnicos y de estabilidad

El diseño de la reconfiguración *in situ* considera criterios mínimos de estabilidad para las condiciones transitorias durante la ejecución y para la configuración final del depósito. En particular, se evita la generación de taludes temporales excesivamente empinados y se privilegia una secuencia de intervención progresiva, compatible con la naturaleza del material de relaves y con la cercanía a zonas habitadas.

El control del escurrimiento superficial se incorpora como un elemento clave del diseño, mediante pendientes suaves, bermas de transición y cunetas simples, siguiendo el enfoque observado en los casos brasileños, donde el drenaje superficial constituye una medida fundamental para la estabilidad post-cierre.

Procedimiento operacional

El procedimiento operacional se estructura en etapas secuenciales y progresivas:

- habilitación del área de trabajo, accesos internos y medidas iniciales de control ambiental;
- redistribución interna del material de relaves mediante excavadora hidráulica y cargador frontal, eliminando la geometría típica de tranque de aguas arriba;
- conformación geomorfológica del depósito, con pendientes suaves y continuidad topográfica con el entorno;
- implementación de drenaje superficial para la conducción controlada de aguas lluvias;
- cobertura superficial, aplicación de suelo vegetal y revegetación progresiva;
- cierre del sitio y retiro de instalaciones temporales.

La ejecución se realiza por sectores, permitiendo reducir gradualmente la superficie de relaves expuestos y controlar la generación de polvo durante toda la operación.

Estimación de costos

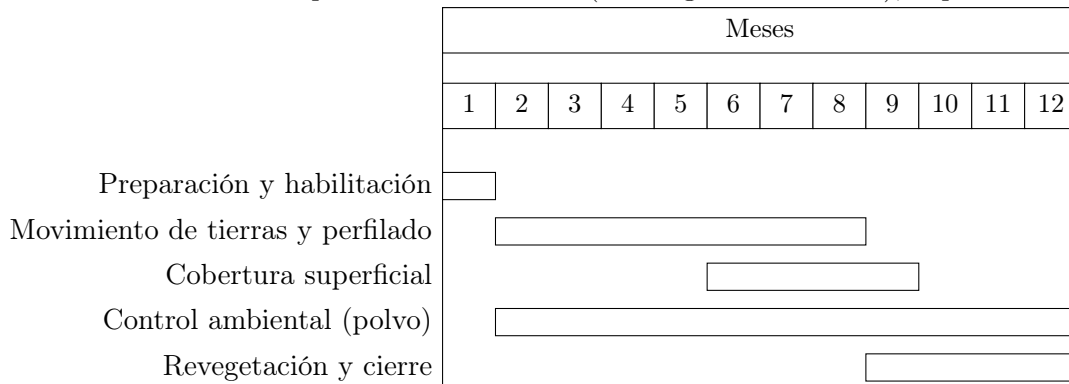
La estimación de costos se realizó considerando rendimientos horarios de maquinaria, costos por hora máquina (HM), costos de mano de obra por hora hombre (HH) y costos directos asociados a control ambiental y revegetación. El costo total estimado para esta alternativa asciende a 511 750 USD, equivalente a un costo unitario aproximado de 2,27 USD/m³. En la Tabla 16 se presentan los costos por categoría asociados al proyecto.

Tabla 16: Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración *in situ*, depósito Flora 1.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m³)
Preparación y habilitación del sitio	35 000	0,16
Movimiento de tierras y redistribución interna	210 000	0,93
Conformación geomorfológica y drenaje superficial	60 000	0,27
Control ambiental (polvo y monitoreo)	55 000	0,24
Cobertura superficial y revegetación	85 000	0,38
Total	445 000	1,98
Gastos generales	66 750	0,29
Total	511 750	2,27

Carta Gantt – Alternativa 1

Figura 6: Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración *in situ*), depósito Flora 1.



Alternativa 2: Remoción total y disposición externa

La alternativa de remoción total tiene como objetivo la eliminación completa del pasivo ambiental asociado al depósito Flora 1, mediante la excavación total del volumen de relaves y su disposición final en una instalación minera activa ubicada fuera del entorno urbano inmediato. Esta alternativa se plantea como una solución de máxima reducción de riesgo, particularmente relevante en contextos de alta sensibilidad territorial.

Criterios técnicos y de estabilidad

Previo al inicio de las operaciones, se definen criterios de estabilidad para las condiciones transitorias durante la excavación, evitando configuraciones que puedan inducir inestabilidades locales. Dado que el depósito corresponde a un tranque de aguas arriba, potencialmente conformado por material de baja densidad, el procedimiento se diseña de manera progresiva y controlada, siguiendo la experiencia documentada en los casos brasileños.

Asimismo, se implementan medidas de manejo de escorrentías superficiales, con el fin de eliminar la función hidráulica del depósito antes de la excavación y reducir el riesgo asociado a eventos de precipitación.

Procedimiento operacional

El procedimiento operacional contempla las siguientes etapas:

- habilitación del sitio, delimitación de áreas de trabajo y control ambiental inicial;
- excavación progresiva del material de relaves, mediante excavadora hidráulica y carguío directo a camiones tolva;
- transporte del material hacia una instalación minera receptora ubicada a una distancia aproximada de 5 km;
- disposición controlada del material en el sitio receptor, con apoyo de cargador frontal;
- recuperación del sitio original mediante perfilado, cobertura superficial y revegetación;

- cierre progresivo del área intervenida.

La corta distancia de transporte permite optimizar los tiempos de ciclo y reducir el impacto logístico de la operación, manteniendo costos unitarios acotados en comparación con depósitos de mayor escala.

Estimación de costos

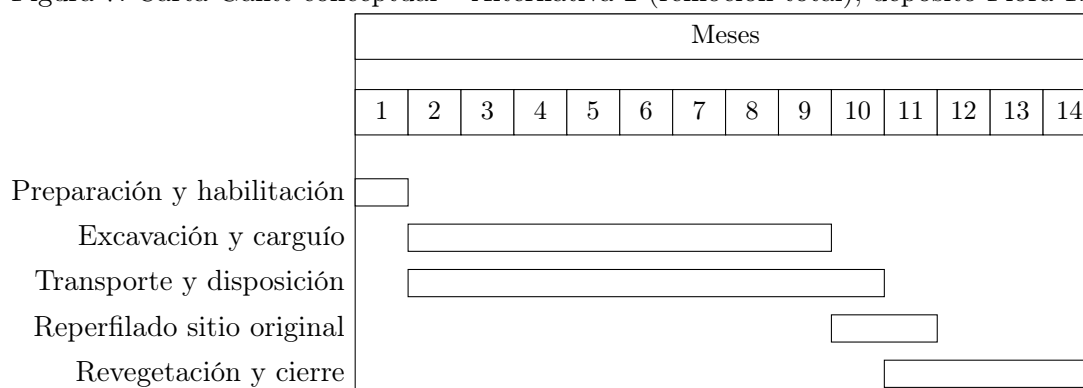
La estimación de costos considera excavación, transporte, disposición externa y recuperación del sitio original. El costo total estimado para esta alternativa asciende a 803 000 USD, equivalente a un costo unitario aproximado de 3,57 USD/m³. En la Tabla se presenta en detalle los costos asociados a esta operación.

Tabla 17: Desglose de costos por categoría – Alternativa 2: Remoción total y disposición externa, depósito Flora 1.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m ³)
Preparación del sitio y control inicial	45 000	0,20
Excavación y carguío de relaves	245 000	1,09
Transporte a sitio receptor (5 km)	285 000	1,27
Disposición controlada en faena receptora	65 000	0,29
Recuperación del sitio original y revegetación	90 000	0,40
Total	730 000	3,25
Gastos generales	73 000	0,32
Total	803 000	3,57

Carta Gantt – Alternativa 2

Figura 7: Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total), depósito Flora 1.



5.5.2. Caso chileno: Depósito Cerro Negro 4 (Cabildo)

El depósito Cerro Negro 4 corresponde a un tranque de relaves de aguas arriba, con un volumen estimado de 1.050.000 m³, ubicado en la comuna de Cabildo, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso. El depósito se emplaza en un entorno minero-agrícola, inserto en la cuenca del río La Ligua, la cual presenta una condición de estrés hídrico estructural y alta sensibilidad frente a procesos de erosión y transporte de sedimentos finos. En la Tabla 18 se presenta su resumen técnico.

Tabla 18: Ficha técnica del depósito Cerro Negro 4 (Cabildo).

Variable	Descripción
Volumen estimado (m ³)	1 050 000
Tipo de instalación	Tranque de relaves de aguas arriba
Localización	Cabildo, Región de Valparaíso
Coordenadas	32.579964°S, 70.883675°O
Altitud aproximada	250–300 m s.n.m.
Proximidad a cursos de agua	Río La Ligua y quebradas tributarias
Infraestructura cercana	Operaciones mineras, rutas pavimentadas, actividad agrícola
Condiciones ambientales	Clima mediterráneo seco, estrés hídrico en la cuenca

A diferencia del caso Flora 1, Cerro Negro 4 no se encuentra en un área urbana consolidada, sino en un sistema de quebradas activas, con pendientes marcadas y conexión directa con la red de drenaje natural. En este contexto, el principal riesgo ambiental asociado al depósito se relaciona con el arrastre de finos hacia la cuenca, la erosión superficial del relave y la exposición prolongada del pasivo en un entorno ambientalmente sensible.

El depósito forma parte de un complejo minero de mayor escala, con presencia de caminos internos y otras instalaciones mineras, lo que permite evaluar alternativas de descaracterización que consideren tanto la intervención *in situ* como la eventual disposición del material dentro del mismo complejo.

Datos de entrada y supuestos generales

Para la ejecución de las alternativas de descaracterización del depósito Cerro Negro 4 se consideró una flota de equipos de mayor envergadura que en el caso Flora 1, acorde al volumen significativo del depósito, su emplazamiento dentro de un complejo minero activo y la necesidad de operar de manera continua y segura durante un periodo prolongado.

A diferencia de depósitos de menor escala, el caso Cerro Negro 4 requiere la habilitación de múltiples frentes de trabajo simultáneos, lo que permite distribuir las operaciones, reducir la exposición a riesgos geotécnicos locales y optimizar los tiempos de ejecución. En este contexto, el dimensionamiento de la maquinaria se realizó considerando una operación progresiva, escalonada y compatible con las prácticas observadas en procesos de descaracterización de gran volumen desarrollados en Brasil.

La maquinaria considerada para el proyecto corresponde a:

- **Excavadoras hidráulicas:** se contempla la operación simultánea de dos excavadoras hidráulicas como equipos principales para la remoción y redistribución del material de relaves.

Estas unidades permiten habilitar más de un frente de trabajo, facilitando la reconfiguración geomorfológica progresiva del depósito y, en el caso de la alternativa de remoción total, una excavación controlada por sectores. El número de excavadoras se justifica por el volumen del depósito y por la necesidad de mantener una tasa de avance compatible con el plazo estimado del proyecto.

- **Camiones tolva:** para el manejo y transporte del material se considera una flota de cuatro camiones tolva. En la alternativa de reconfiguración *in situ*, estos equipos se emplean principalmente para el traslado interno del material dentro del depósito, permitiendo una redistribución eficiente entre sectores. En la alternativa de remoción completa, los camiones cumplen un rol central en el transporte del material hacia instalaciones receptoras ubicadas dentro del mismo complejo minero. El número de unidades se define de manera que permita un flujo continuo de material sin generar cuellos de botella en los frentes de excavación.
- **Cargador frontal:** se considera un cargador frontal destinado a labores de apoyo operativo, tales como conformación de superficies, nivelación fina, extendido de material en zonas de disposición y apoyo a las etapas finales de perfilado y cierre. Este equipo resulta clave para asegurar la calidad geométrica de las superficies finales y para optimizar las etapas no directamente asociadas a la excavación principal.
- **Equipos auxiliares y de apoyo:** adicionalmente, se contempla el uso de equipos auxiliares tales como camiones aljibe para control de polvo, maquinaria menor para la ejecución de obras de drenaje superficial, y vehículos livianos para supervisión, monitoreo geotécnico y control ambiental durante la ejecución del proyecto.

El dimensionamiento de la flota responde a la escala del depósito Cerro Negro 4 y a la experiencia documentada en procesos de descaracterización de depósitos de gran volumen, donde se prioriza el uso de múltiples equipos operando de manera coordinada, junto con un control permanente de las condiciones de estabilidad y seguridad operacional.

Asimismo, la selección de esta flota resulta coherente con el carácter minero del entorno, permitiendo una operación más intensiva que en contextos urbanos, sin comprometer los estándares de seguridad, control ambiental y trazabilidad requeridos para este tipo de intervenciones.

Alternativa 1: Reconfiguración *in situ* con enfoque geomorfológico e hidrológico

La alternativa de reconfiguración *in situ* tiene como objetivo eliminar la condición de tranque de relaves mediante la reconfiguración geomorfológica del depósito, manteniendo el material dentro del mismo emplazamiento y transformándolo en una estructura estable, sin función hidráulica y compatible con el entorno minero circundante.

Este enfoque es coherente con los casos brasileños de gran volumen, donde la descaracterización progresiva mediante reconfiguración interna ha demostrado ser una solución técnica y económicamente eficiente, especialmente cuando existen restricciones logísticas para la remoción total del material.

Criterios técnicos y de estabilidad

El diseño de la alternativa considera criterios de estabilidad tanto para las condiciones transitorias durante la ejecución como para la configuración final del depósito. Se adoptan pendientes finales suaves, bermas intermedias y una geometría continua, orientada a garantizar factores de seguridad adecuados frente a condiciones estáticas.

Asimismo, se prioriza la eliminación del rol hidráulico del depósito, mediante el control de escorrentías superficiales y la conducción adecuada de aguas lluvias, siguiendo el enfoque observado en los procesos de descaracterización implementados en Brasil.

Procedimiento operacional

El procedimiento operacional se estructura en etapas progresivas, con múltiples frentes de trabajo coordinados:

- habilitación del área de trabajo, accesos operacionales y control ambiental inicial;
- caracterización geotécnica básica y definición de la geometría objetivo del depósito;
- redistribución interna del material de relaves mediante excavadoras hidráulicas, eliminando la geometría típica de tranque de aguas arriba;
- conformación geomorfológica del depósito, con pendientes suaves y bermas de transición;
- implementación de drenaje superficial mediante cunetas y canales perimetrales;
- cobertura superficial, estabilización y control de erosión;
- revegetación y cierre progresivo del área intervenida;
- monitoreo y control de estabilidad durante y después de la ejecución.

La ejecución se realiza de manera escalonada, permitiendo la superposición de etapas de conformación y cierre con las fases finales de movimiento de tierras, tal como se observa en los casos brasileños analizados.

Estimación de costos

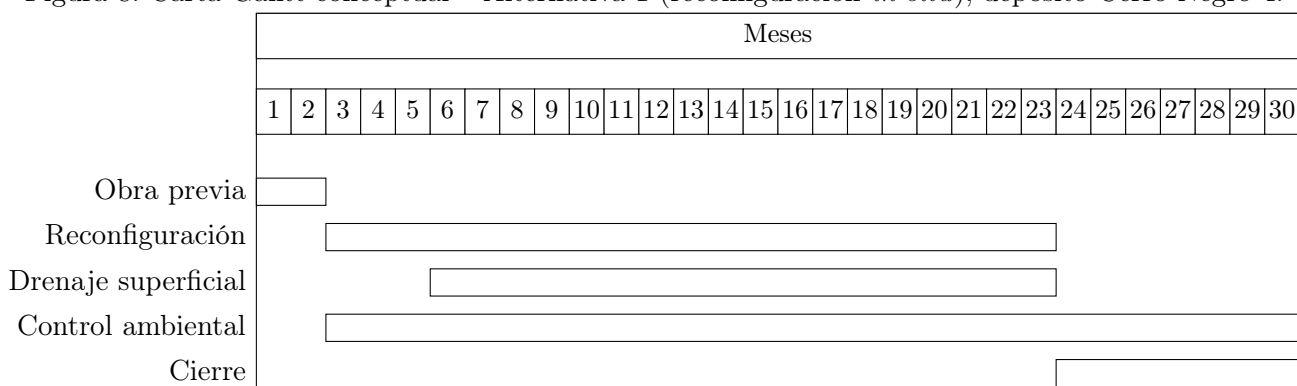
La estimación de costos se realizó considerando rendimientos horarios de maquinaria, costos unitarios por hora máquina (HM), costos de mano de obra por hora hombre (HH), así como costos asociados a control ambiental, monitoreo, revegetación y cierre. El costo total estimado para esta alternativa asciende a aproximadamente 3 056 000 USD, equivalente a un costo unitario del orden de 2,9 USD/m³. En la Tabla 19 se observan los costos asociados a cada categoría del proyecto.

Tabla 19: Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración *in situ*, depósito Cerro Negro 4.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m³)
Preparación y habilitación del sitio	185 000	0,18
Movimiento de tierras y reconfiguración geomorfológica	1 480 000	1,41
Manejo de aguas y drenaje superficial	210 000	0,20
Monitoreo geotécnico y control de seguridad	212 000	0,20
Control ambiental (polvo y escorrentías)	160 000	0,15
Revegetación y cierre progresivo	409 875	0,39
Total	2 656 875	2,53
Gastos generales	398 531	0,38
Total	3 055 406	2,91

Carta Gantt – Alternativa 1

Figura 8: Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración *in situ*), depósito Cerro Negro 4.



Alternativa 2: Remoción total con disposición interna en el complejo Cerro Negro

La alternativa de remoción completa tiene como objetivo eliminar la estructura original del depósito Cerro Negro 4, mediante la excavación total del volumen de relaves y su redistribución controlada dentro de instalaciones del mismo complejo minero. Esta alternativa busca una reducción más directa del riesgo asociado al depósito, manteniendo la operación dentro de un entorno minero controlado.

Criterios técnicos y de estabilidad

Dado el volumen significativo del depósito, la remoción se diseña como un proceso progresivo y sectorizado, evitando excavaciones simultáneas en grandes superficies. Se definen criterios de estabilidad para las condiciones temporales, manteniendo bermas de seguridad y geometrías estables durante la excavación.

El manejo de escorrentías y la eliminación de aportes hídricos al frente de trabajo constituyen elementos centrales del diseño, en coherencia con las prácticas observadas en los casos brasileños de remoción total.

Procedimiento operacional

El procedimiento operacional contempla las siguientes etapas:

- habilitación del sitio, control de accesos y medidas ambientales iniciales;
- excavación progresiva del material de relaves mediante excavadoras hidráulicas;
- carguío controlado y transporte interno hacia instalaciones receptoras del complejo minero;
- disposición controlada del material, con extendido y conformación en el sitio receptor;
- reperfilado del sitio original del depósito, eliminando la geometría de tranque;
- cobertura superficial, control de erosión y revegetación;
- cierre progresivo y monitoreo de estabilidad post-ejecución.

A diferencia del caso Flora 1, la logística de transporte se desarrolla íntegramente dentro del complejo minero, lo que permite mayores rendimientos y una reducción relativa del impacto ambiental asociado al tránsito de camiones.

Estimación de costos

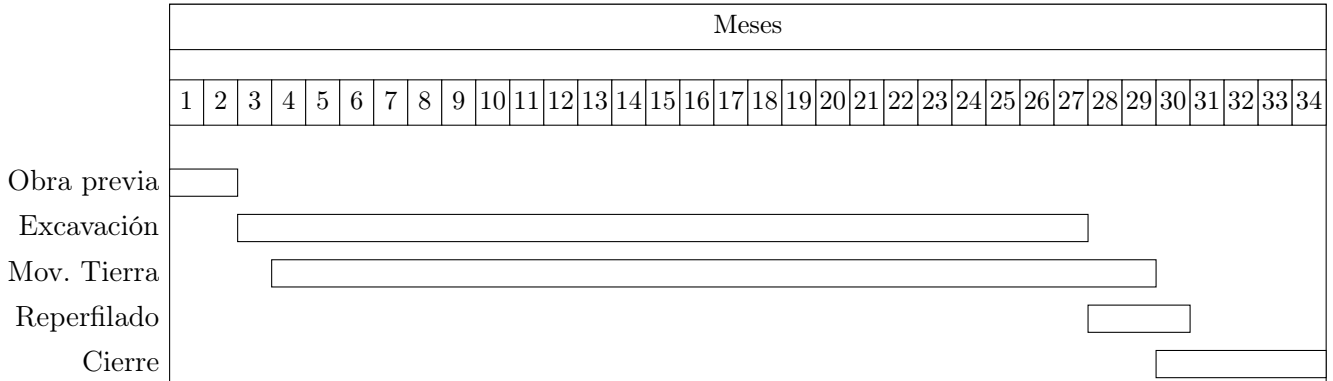
La estimación de costos considera excavación, carguío, transporte interno, redistribución del material, así como costos de monitoreo, gestión ambiental y cierre. El costo total estimado para esta alternativa asciende a aproximadamente 3 818 000 USD, equivalente a un costo unitario del orden de 3,6 USD/m³, valor coherente con la mayor complejidad operacional y logística del proceso. En la Tabla 20 se presenta en detalle por categoría los costos asociados a esta alternativa.

Tabla 20: Desglose de costos por categoría – Alternativa 2: Remoción completa y redistribución interna, depósito Cerro Negro 4.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m³)
Preparación del sitio y control inicial	210 000	0,20
Excavación y carguío de relaves	1 120 000	1,07
Transporte interno dentro del complejo minero	865 000	0,82
Disposición controlada en recinto receptor	365 000	0,35
Reperfilado del sitio original	270 000	0,26
Control ambiental y monitoreo	250 000	0,24
Revegetación y cierre final	240 090	0,23
Total	3 320 090	3,16
Gastos generales	498 014	0,47
Total	3 818 104	3,64

Carta Gantt – Alternativa 2

Figura 9: Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total con disposición interna), depósito Cerro Negro 4.



5.5.3. Caso chileno: Depósito Ojancos 1 (Copiapó)

El depósito Ojancos 1 corresponde a un depósito de relaves de pequeña a mediana escala, ubicado en un entorno minero–rural de la Región de Atacama. El depósito se emplaza en un sector de baja densidad poblacional, con presencia de caminos mineros y faenas activas en su entorno, lo que condiciona tanto las alternativas técnicas de intervención como la logística asociada a su descaracterización.

Desde el punto de vista geomorfológico, el depósito se encuentra emplazado en un entorno de topografía moderada, característico de zonas precordilleranas y de transición hacia sectores más áridos, con presencia de quebradas secas o de escurrimiento intermitente. Estas condiciones implican que, si bien el riesgo directo hacia población es menor que en el caso Flora 1, el depósito mantiene una relevancia ambiental asociada a la potencial movilización de material fino frente a eventos de precipitación intensa o vientos persistentes.

A diferencia de los casos Flora 1 y Cerro Negro 4, el depósito Ojancos 1 no se inserta directamente dentro de un complejo minero con instalaciones de disposición disponibles en el mismo emplazamiento. En consecuencia, cualquier alternativa de remoción total del material requiere el transporte de los relaves hacia instalaciones externas, ubicadas a distancias del orden de decenas de kilómetros.

En este contexto, se identifican como alternativas viables de disposición externa la Planta Manuel Antonio Matta Ruiz, ubicada aproximadamente a 14 km del depósito, y la Planta Pucobre, ubicada a una distancia aproximada de 17 km. Estas distancias, significativamente mayores que las consideradas en el caso Flora 1, convierten al transporte en un componente crítico del proceso de descaracterización, influyendo directamente en la duración del proyecto y en los costos unitarios asociados.

Desde el punto de vista técnico, el depósito Ojancos 1 presenta una geometría relativamente simple en comparación con Cerro Negro 4, lo que permite una excavación progresiva sin requerir múltiples frentes simultáneos. Sin embargo, la logística de transporte externo y la necesidad de coordinar la recepción del material en instalaciones activas introducen una complejidad operacional relevante, que debe ser considerada explícitamente en la evaluación de alternativas.

El análisis del caso Ojancos 1 se desarrolla aplicando los principios observados en los procesos de descarterización estudiados en Brasil, adaptándolos a un escenario donde el transporte externo constituye el factor dominante del proceso, y donde la selección de la instalación receptora puede generar variaciones relevantes en los costos y en el desempeño global de la alternativa de remoción total. En la Tabla 21 se presenta la ficha técnica del depósito.

Tabla 21: Ficha técnica del depósito Ojancos 1 (Copiapó).

Variable	Descripción
Volumen estimado (m ³)	3 202 671
Tipo de instalación	Tranque de relaves de aguas arriba
Localización	Copiapó, Región de Atacama
Coordenadas	27.367348°S, 70.345456°O
Altitud aproximada	380–400 m s.n.m.
Proximidad a cursos de agua	Cuenca del río Copiapó (tramos secos)
Infraestructura cercana	Ciudad de Copiapó, talleres, servicios mineros
Condiciones ambientales	Clima desértico, alta radiación y baja precipitación

Datos de entrada y supuestos generales

Para la evaluación de alternativas se adoptó un enfoque de dimensionamiento por escala, consistente con lo observado en los casos brasileños: la duración resulta del volumen del depósito y de la dotación de equipos (y no de un plazo objetivo predeterminado), priorizando la reducción temprana de superficies expuestas, la sectorización de la excavación y la integración de medidas ambientales durante toda la ejecución. Los costos base de HM y HH utilizados para estimaciones provienen de antecedentes de proyectos mineros desarrollados en Chile y valores entregados por la industria.

Maquinaria considerada para el proyecto

Debido al volumen del depósito y a la necesidad de mantener frentes de trabajo simultáneos sin expandir innecesariamente el área de exposición de relaves, se considera la siguiente dotación (ajustada a las particularidades del caso Ojancos 1):

- **Excavadoras hidráulicas:** 4 unidades operando en paralelo, con excavación progresiva por sectores. Esta dotación permite (i) mantener bermas de seguridad y geometrías transitorias estables durante la remoción interna o total, y (ii) ejecutar cierres parciales por sectores sin esperar el término de toda la excavación.
- **Camiones tolva:**
 - Alternativa 1 (*in situ*): 6 unidades para traslados internos, redistribución y conformación de plataformas.
 - Alternativa 2 (remoción total): 10 unidades, debido a que la distancia a receptor externo (14–17 km) incrementa el tiempo de ciclo y exige una mayor flota para evitar tiempos muertos en el frente de excavación.
- **Cargador frontal:** 2 unidades para apoyo continuo en extendido, perfilado fino, preparación de superficies de cobertura y apoyo en el receptor (en alternativa 2).

- **Equipos auxiliares:** 2 camiones aljibe dedicados a supresión de polvo (frente de excavación, rutas internas y accesos), más maquinaria menor para drenaje superficial y vehículos livianos para supervisión, monitoreo y control ambiental.

Alternativa 1: Reconfiguración *in situ* con cierre progresivo por sectores

La alternativa de reconfiguración *in situ* tiene como objetivo eliminar la condición funcional de tranque de relaves mediante la reconfiguración geomorfológica del depósito, manteniendo el material dentro del mismo emplazamiento. En coherencia con experiencias brasileñas, el enfoque se basa en una ejecución progresiva, por sectores, donde las etapas de estabilización superficial y cierre se solapan con el movimiento de tierras para minimizar superficies expuestas.

Criterios técnicos y de estabilidad

El diseño prioriza (i) estabilidad transitoria durante la intervención, evitando excavación simultánea extensa y manteniendo bermas de seguridad; (ii) geometría final con pendientes suaves y bermas intermedias para reducir la longitud efectiva de escurrimiento; y (iii) control de erosión y polvo, especialmente relevante en clima desértico y entorno con exposición pública. Se incorpora drenaje superficial simple y robusto, orientado a desviar escorrentías y evitar cárcavas sobre el cuerpo reconfigurado.

Procedimiento operacional

El procedimiento se estructura de manera sectorizada:

- habilitación inicial del área de trabajo, señalización, control de accesos y preparación de rutas internas, priorizando segregación de tránsito respecto a vías de uso público;
- definición de sectores de intervención y secuencia de avance, estableciendo bermas temporales y zonas de operación para excavadoras y camiones;
- redistribución interna del material, eliminando la geometría típica de aguas arriba mediante excavación controlada, traslado corto y extendido, manteniendo control de estabilidad en el frente;
- conformación progresiva de taludes y bermas, con perfilado fino (cargadores) y corrección de depresiones que puedan concentrar escurrimientos;
- implementación de drenaje superficial (cunetas/canales de coronación y desvío), con puntos de descarga controlados y protección contra erosión donde corresponda;
- aplicación continua de control ambiental: supresión de polvo (camiones aljibe) y control de tránsito (velocidad, humectación de rutas, limpieza de accesos);
- cobertura superficial y estabilización por sectores (sellado/regularización y/o suelo vegetal según disponibilidad), seguida de revegetación progresiva;
- monitoreo y control durante la ejecución (inspecciones visuales, control de polvo, verificación de drenajes) y cierre final del sector intervenido.

Estimación de costos

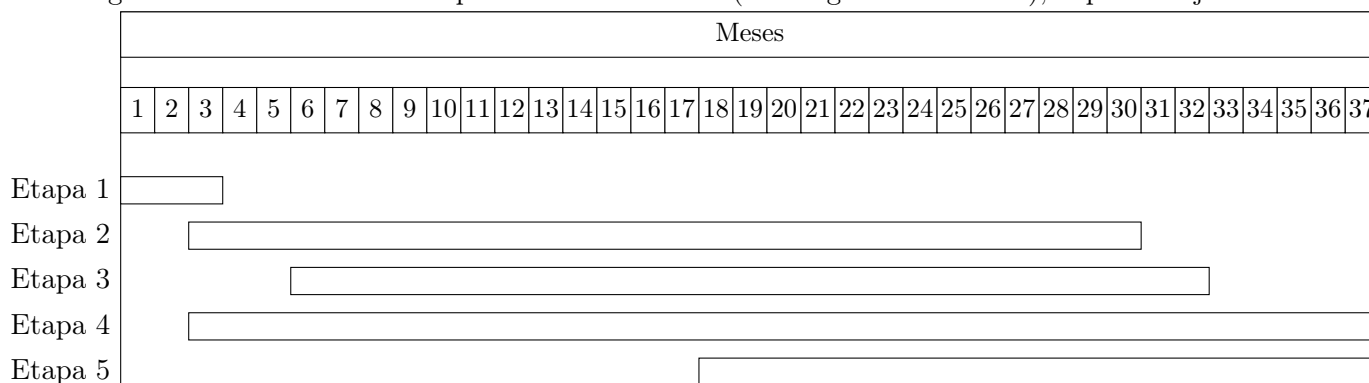
La estimación se realizó utilizando la misma metodología aplicada en Flora 1 y Cerro Negro 4, basada en rendimientos de maquinaria, costos por hora máquina (HM), costos de mano de obra (HH) y costos directos de control ambiental, drenaje y revegetación, incorporando un 15 % por gastos generales, seguridad y contingencias. El costo total estimado para esta alternativa es del orden de 6,9 millones USD, equivalente a un costo unitario aproximado de 2,15 USD/m³. El detalle por categoría se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22: Desglose de costos por categoría – Alternativa 1: Reconfiguración *in situ*, depósito Ojancos 1.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m ³)
Movimiento de tierras y redistribución interna	3 950 000	1,23
Conformación geomorfológica y drenaje superficial	1 120 000	0,35
Control ambiental y monitoreo (polvo, tránsito, seguridad)	820 000	0,26
Cobertura superficial y suelo vegetal	620 000	0,19
Revegetación y cierre progresivo	390 000	0,12
Total (directo)	6 900 000	2,15
Gastos generales	1 035 000	0,32
Total	7 935 000	2,48

Carta Gantt – Alternativa 1

Figura 10: Carta Gantt conceptual – Alternativa 1 (reconfiguración *in situ*), depósito Ojancos 1.



En la Figura 10, la etapa 1 hace alusión a la preparación y habilitación del terreno, la segunda etapa se refiere a la redistribución interna del relave, la tercera etapa contempla la conformación geomorfológica y drenaje de la zona, la cuarta etapa al control ambiental continuo durante el proyecto y finalmente la quinta etapa sería la cobertura, revegetación y cierre progresivo.

Alternativa 2: Remoción total y disposición externa (sensibilidad Matta vs. Pucobre)

La alternativa de remoción total considera la extracción completa del volumen de relaves del depósito Ojancos 1, seguida de su transporte y disposición final en una instalación minera receptora externa. Conceptualmente, esta alternativa se alinea con enfoques de descaracterización total observados en Brasil en contextos de alta sensibilidad, al eliminar completamente el pasivo en el emplazamiento original.

Criterios técnicos y de estabilidad

La excavación se define como un proceso progresivo y sectorizado, manteniendo bermas de seguridad y una geometría temporal controlada. Dada la cercanía a la ciudad, el control ambiental intensivo (polvo y tránsito) y la segregación de accesos constituyen criterios centrales. Se considera además la coordinación operacional con el receptor para evitar esperas prolongadas de camiones y acumulación de material en el frente de carguío.

Procedimiento operacional

- habilitación del sitio, control de accesos, rutas internas, puntos de lavado/limpieza de ruedas y plan de supresión de polvo;
- excavación por sectores, con carguío controlado y mantenimiento de bermas temporales;
- transporte externo en camiones tolva hacia el receptor seleccionado;
- recepción y disposición controlada en la planta receptora, con extendido, conformación y control de polvo en el punto de descarga;
- reperfilado final del sitio original, eliminando la geometría de tranque y restituyendo una superficie estable;
- drenaje superficial y control de erosión en el área recuperada;
- cobertura superficial, revegetación y cierre final, con monitoreo post-ejecución.

Sitios receptores y análisis de sensibilidad

Para la disposición externa se consideran dos destinos potenciales:

- Planta Manuel Antonio Matta Ruiz (aprox. 14 km): escenario base.
- Planta Minera Pucobre (aprox. 17 km): escenario de sensibilidad por mayor distancia.

Estimación de costos

Utilizando los mismos costos unitarios HM/HH empleados en los casos chilenos anteriores, se obtienen los resultados resumidos en las Tablas 23 y 24. Los resultados evidencian la alta sensibilidad del costo frente a la distancia de transporte, debido al carácter dominante del acarreo externo en esta alternativa.

Tabla 23: Desglose de costos por categoría – Alternativa 2 (disposición en Planta Manuel Antonio Matta Ruiz), depósito Ojancos 1.

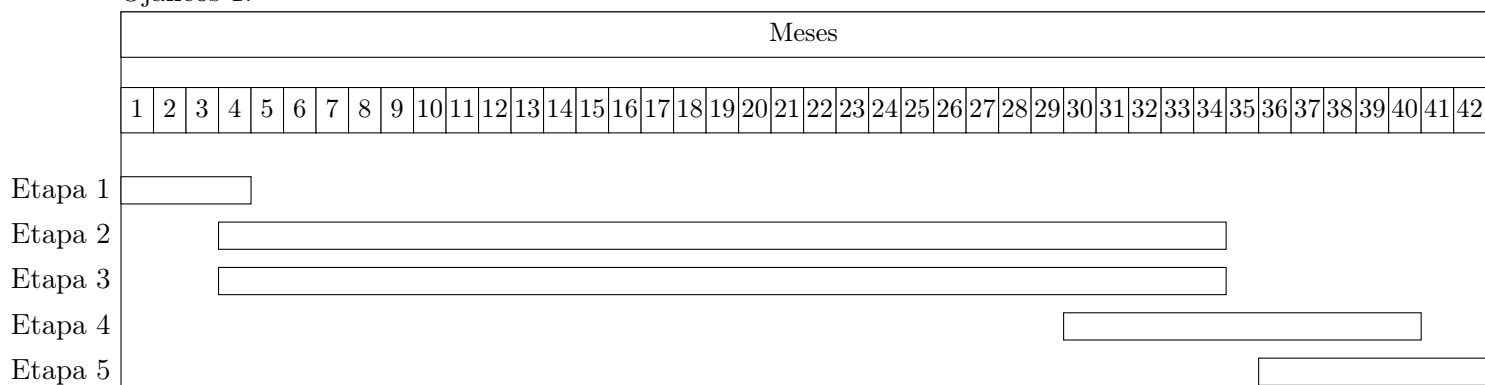
Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m³)
Excavación y carguío	3 600 000	1,12
Transporte externo (14 km)	10 050 000	3,14
Disposición en faena receptora	1 950 000	0,61
Recuperación del sitio original (perfilado, drenaje, cobertura)	1 800 000	0,56
Total (directo)	17 400 000	5,43
Gastos generales	2 610 000	0,82
Total	20 010 000	6,25

Tabla 24: Análisis de sensibilidad – Alternativa 2 (disposición en Planta Pucobre), depósito Ojancos 1.

Categoría	Costo (USD)	Costo (USD/m³)
Excavación y carguío	3 600 000	1,12
Transporte externo (17 km)	11 600 000	3,62
Disposición en faena receptora	1 950 000	0,61
Recuperación del sitio original (perfilado, drenaje, cobertura)	1 800 000	0,56
Total (directo)	19 000 000	5,94
Gastos generales	2 850 000	0,89
Total	21 850 000	6,83

Carta Gantt – Alternativa 2

Figura 11: Carta Gantt conceptual – Alternativa 2 (remoción total y disposición externa), depósito Ojancos 1.



En la Figura 11, la etapa 1, al igual que en la alternativa 1, se refiere a la preparación y habilitación del terreno, la segunda etapa abarca la excavación sectorizada, la tercera etapa contempla el movimiento de tierra, la cuarta etapa la recuperación del sitio original y la quinta etapa sería la cobertura, revegetación y cierre progresivo.

5.6. Resultados ambientales

Tabla 25: Indicadores ambientales observados en Brasil y proyección al contexto chileno.

Indicador ambiental	Valor promedio en Brasil	Valor estimado para Chile	Fuente / Método de extrapolación
Reducción del potencial erosivo	70–80 %	≈ 75 %	FEAM (2023); mediciones en B1–Itaminas y Vigia–CSN.
Aumento de cobertura vegetal	+55–65 %	≈ 60 %	FEAM (2023); MPMG (2024).
Estabilidad física (FS)	1.35–1.60	≥ 1.3 (meta mínima)	Cálculos de FEAM y Guía de Cierre SERNAGEOMIN (2018).
Reducción de infiltraciones superficiales	40–50 %	≈ 45 %	Relatório Vale (2023); modelo de drenaje FEAM.
Reducción de polvo total (PM ₁₀)	65–75 %	≈ 70 %	MMA (2022); Guía de Control Particulado; extrapolación por régimen semiárido.
Reducción de escurrimiento ácido (pH < 5)	80 %	≈ 80 %	FEAM (2023); MPMG (2024).
Reducción de riesgo químico (metal disuelto)	60–75 %	≈ 70 %	FEAM (2023); simulaciones Vale (2023).
Tiempo de estabilización hidrológica	18–24 meses	24 meses	SERNAGEOMIN (2018); adaptación climática al contexto chileno.

A partir del análisis de los indicadores ambientales observados en los casos brasileños de descarterización y su proyección al contexto chileno, se espera que la aplicación de esta estrategia genere mejoras ambientales significativas, particularmente en términos de estabilidad física, control de procesos erosivos y reducción de riesgos asociados a la interacción del relave con el medio ambiente. Tal como se sintetiza en la Tabla 25, los resultados proyectados para Chile se mantienen dentro de rangos coherentes con la experiencia internacional, ajustados a las condiciones climáticas y regulatorias locales.

En primer lugar, se espera una reducción sustancial del potencial erosivo, del orden de un 75 %, asociada principalmente a la reconfiguración geométrica de los depósitos, la disminución de pendientes críticas y la implementación de sistemas de drenaje superficial controlado. Este efecto se ve reforzado por el aumento proyectado de la cobertura vegetal, estimado en torno a un 60 %, lo que contribuye tanto a la protección del suelo frente a la erosión hídrica y eólica como a la integración paisajística de los sitios intervenidos. La revegetación, además, actúa como una medida pasiva de estabilización de largo plazo, especialmente relevante en escenarios post-cierre.

Desde el punto de vista de la estabilidad física, los casos brasileños muestran factores de seguridad finales comprendidos entre 1,35 y 1,60, lo que permite establecer como meta mínima para el contexto chileno un valor de $FS \geq 1,3$, en concordancia con los lineamientos de cierre definidos por SERNAGEOMIN. Este aumento en la estabilidad estructural reduce de manera directa el riesgo de fallas geotécnicas y constituye uno de los principales beneficios ambientales de la descarterización,

al eliminar configuraciones constructivas consideradas de mayor riesgo, como los recrecimientos del muro aguas arriba.

En relación con la dinámica hídrica, se proyecta una reducción cercana al 45 % en las infiltraciones superficiales, como resultado de la mejora en los sistemas de drenaje, la compactación controlada de superficies y la disminución de la conectividad hidráulica del depósito. Asimismo, la reducción del escurrimiento ácido ($\text{pH} < 5$), estimada en torno a un 80 %, y la disminución del riesgo químico asociado a metales disueltos (aproximadamente 70 %), sugieren una mejora relevante en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas aguas abajo de los depósitos intervenidos. Estos efectos son particularmente relevantes en el contexto chileno, donde la disponibilidad hídrica es limitada y la protección de los cursos de agua constituye una prioridad ambiental.

Otro resultado ambiental esperado corresponde a la reducción de emisiones de material particulado, especialmente PM_{10} , con valores proyectados cercanos al 70 %. Esta disminución se asocia a la eliminación de superficies expuestas de relaves finos, al control de la erosión eólica y al establecimiento de coberturas vegetales o capas protectoras, lo que contribuye tanto a la mejora de la calidad del aire local como a la reducción de impactos sobre comunidades cercanas y ecosistemas sensibles.

Finalmente, en términos temporales, los antecedentes analizados indican que el tiempo de estabilización hidrológica posterior a la descaracterización se sitúa típicamente entre 18 y 24 meses en los casos brasileños, por lo que se adopta de manera conservadora un horizonte de aproximadamente 24 meses para el contexto chileno. Este plazo considera las diferencias climáticas, particularmente en zonas semiáridas, y refuerza la necesidad de implementar programas de monitoreo ambiental durante las etapas iniciales posteriores a la intervención.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que la descaracterización de depósitos de relaves, aplicada bajo criterios técnicos adecuados y con ajustes al contexto local, presenta un alto potencial de mejora ambiental en Chile, contribuyendo a la reducción de riesgos físicos y químicos, a la recuperación funcional de los sitios intervenidos y a la mitigación de impactos de largo plazo asociados a pasivos mineros abandonados.

5.7. Resultados sociales

Tabla 26: Indicadores sociales observados en Brasil y proyección al contexto chileno.

Dimensión	Indicador / Efecto cuantificable	Resultado en Brasil (casos 100 %)	Proyección en Chile	Fuente / Método
Seguridad pública	Eliminación del riesgo estructural y químico	100 % reducción del riesgo de ruptura	100 % eliminación del riesgo a terceros	MPMG (2024); FEAM (2023).
Empleo temporal directo	Promedio de trabajadores por faena	150–200 personas / proyecto	100–160 personas / proyecto	FEAM (2023); extrapolación a escala chilena.
Duración media del empleo	Meses de actividad	18–24 meses	24 meses promedio	FEAM (2023); ajustado por logística local.
Participación local	% mano de obra de la región	70–85 %	≈ 80 % (meta)	MPMG (2024); políticas de contratación local del DS 72/2019.
Percepción social positiva	Encuestas post-descaracterización	+65 % de mejora en percepción comunitaria	+60–70 % proyectado	MPMG (2024); Banco Mundial (2022).
Valor del suelo recuperado	USD/ha después del cierre	+30 % incremento promedio	+25–30 % estimado	FEAM (2023); Cochilco (2023).
Reutilización territorial	% superficie apta para nuevos usos	55–70 %	≈ 60 % en Chile	FEAM (2023); SERNA-GEOMIN (2018).
Accidentes / incidentes laborales	Frecuencia registrada	0.0 (sin incidentes graves reportados)	0.0 (meta)	MPMG (2024).

A partir de la experiencia observada en los casos brasileños de descaracterización y su proyección al contexto chileno, se espera que la implementación de este tipo de proyectos genere beneficios sociales relevantes, especialmente en términos de seguridad pública, empleo local, percepción comunitaria y recuperación territorial. Tal como se resume en la Tabla 26, los indicadores sociales proyectados para Chile se sitúan en rangos consistentes con los resultados obtenidos en Brasil, ajustados a la escala de los proyectos y a las particularidades normativas y sociales del país.

Desde el punto de vista de la seguridad pública, la descaracterización permite la eliminación efectiva del riesgo estructural y químico asociado a depósitos de relaves construidos bajo configuraciones históricas de mayor vulnerabilidad. En los casos brasileños analizados, esta intervención se traduce en una reducción del 100 % del riesgo de ruptura, lo que permite proyectar para Chile la eliminación del riesgo a terceros como resultado directo del proceso. Este efecto constituye uno de los principales aportes sociales de la descaracterización, al reducir la exposición de comunidades ubicadas aguas abajo y disminuir la percepción de amenaza permanente asociada a estos pasivos mineros.

En términos de empleo temporal directo, los antecedentes indican que los proyectos de descaracterización en Brasil generan entre 150 y 200 puestos de trabajo por faena, con duraciones promedio de entre 18 y 24 meses. Al extrapolar estos resultados al contexto chileno, se proyecta la generación de aproximadamente entre 100 y 160 empleos temporales por proyecto, considerando diferencias de escala, logística y duración de las obras. Este empleo se concentra principalmente en etapas de movimiento de tierras, obras civiles, drenaje, control ambiental y revegetación, contribuyendo de manera directa a la dinamización económica local durante el período de ejecución.

Un aspecto clave identificado en los casos brasileños corresponde a la participación de mano de obra local, con valores observados entre 70 y 85 %. Para Chile, se establece como meta razonable una participación local cercana al 80 %, en coherencia con las políticas de contratación local vigentes y con las expectativas de las comunidades anfitrionas. Este enfoque no sólo potencia los beneficios económicos directos del proyecto, sino que también fortalece la aceptación social de las intervenciones y reduce potenciales conflictos asociados a la percepción de exclusión laboral.

La percepción social posterior a la descaracterización muestra mejoras significativas en los casos analizados, con incrementos del orden del 65 % en los niveles de percepción comunitaria positiva. Para el contexto chileno, se proyecta una mejora comprendida entre el 60 y 70 %, asociada principalmente a la reducción del riesgo percibido, a la eliminación de restricciones de uso del suelo y a la mayor transparencia en los procesos de cierre y monitoreo. Este resultado destaca la importancia de complementar las obras físicas con estrategias de comunicación, educación ambiental y participación temprana de las comunidades.

Otro impacto social relevante se relaciona con el valor del suelo recuperado, el cual presenta incrementos promedio cercanos al 30 % en los casos brasileños. Para Chile, se estima un aumento potencial entre 25 y 30 %, particularmente en áreas donde la descaracterización permite habilitar nuevos usos productivos, recreativos o de conservación. En este sentido, la reutilización territorial emerge como un beneficio social de largo plazo, con proyecciones de entre 55 y 70 % de la superficie apta para nuevos usos en Brasil y un valor cercano al 60 % estimado para el contexto chileno.

Finalmente, los registros asociados a accidentes laborales en los proyectos analizados indican una frecuencia nula de incidentes graves, lo que permite establecer como meta para Chile una tasa de accidentes graves igual a cero. Este resultado refuerza la relevancia de implementar sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional robustos, especialmente considerando que las actividades de descaracterización involucran maquinaria pesada, movimiento de grandes volúmenes de material y trabajos en zonas previamente clasificadas como de alto riesgo.

En conjunto, los resultados sociales esperados para Chile sugieren que la descaracterización de depósitos de relaves no sólo constituye una medida de mitigación de riesgos, sino también una oportunidad de generación de valor social, al mejorar las condiciones de seguridad, empleo, percepción comunitaria y uso futuro del territorio. Estos beneficios, sin embargo, dependen de una adecuada planificación social del proyecto, de la incorporación temprana de las comunidades y de la coherencia entre las medidas técnicas y las expectativas territoriales.

6. Análisis y discusión de resultados

6.1. Coherencia de los resultados con los objetivos de la investigación

El objetivo general de esta memoria fue evaluar la aplicabilidad de la metodología brasileña de descaracterización de depósitos de relaves al contexto chileno, con énfasis en depósitos abandonados construidos con el método de aguas arriba. Para ello se formularon objetivos específicos orientados al análisis normativo-comparado, la caracterización técnica y económica de casos de estudio y la estimación de impactos ambientales y sociales asociados.

En el ámbito económico, los resultados obtenidos muestran coherencia con los objetivos de la investigación al permitir una primera aproximación al orden de magnitud de los costos asociados a la descaracterización de depósitos de relaves abandonados en Chile, a partir de la experiencia brasileña. La estimación de costos unitarios (USD/m³) y de inversiones totales ajustadas al contexto chileno evidencia que la aplicación de esta metodología implica desembolsos significativos, pero comparables con los rangos de inversión asociados a medidas de cierre, estabilización y control de pasivos mineros contempladas en la normativa nacional.

En particular, la Ley N° 20.551 sobre Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras establece el principio de responsabilidad del titular frente a los riesgos ambientales y a la estabilidad física y química de los depósitos, incorporando la obligación de garantizar financieramente las medidas de cierre. Si bien dicha ley no contempla explícitamente la figura de la descaracterización como alternativa normativa, los costos estimados en esta memoria se sitúan dentro de un marco económicamente coherente con las exigencias de cierre reforzado que serían necesarias para depósitos de alto riesgo, especialmente aquellos construidos con el método de aguas arriba.

Asimismo, los resultados económicos permiten identificar economías de escala y una relación decreciente entre volumen de relaves y costo unitario de intervención, lo que refuerza la plausibilidad económica de la metodología brasileña cuando se analizan depósitos de gran volumen o cuando se considera una estrategia de intervención programada a nivel territorial. Esta coherencia es relevante para el cumplimiento del objetivo específico de evaluar la viabilidad económica de extrapolar experiencias internacionales al contexto chileno, considerando ajustes por factores locales como costos de mano de obra, equipos, logística y condiciones normativas.

En este sentido, el análisis económico no busca reemplazar estudios de ingeniería de detalle ni presupuestos oficiales de cierre, sino entregar una base comparativa que permita dimensionar la descaracterización como una alternativa técnicamente robusta y económicamente justificable frente a escenarios de riesgo residual elevado, costos de mantenimiento de largo plazo o ausencia de responsables activos. De este modo, los resultados económicos obtenidos se alinean con los objetivos de la investigación, aportando evidencia cuantitativa para discutir la factibilidad de incorporar la descaracterización dentro de futuras estrategias de gestión de pasivos mineros en Chile.

En el ámbito ambiental y social, los indicadores recopilados para los casos de Minas Gerais muestran mejoras relevantes en términos de estabilidad física e hidráulica, control de drenaje y reducción de la exposición de comunidades a riesgos asociados a relaves. Estos resultados permiten proyectar beneficios plausibles para Chile bajo condiciones climáticas semiáridas, siempre que la implementación considere las particularidades territoriales de cada depósito.

En conjunto, estos elementos responden de forma directa a los objetivos planteados: los resultados no sólo describen el funcionamiento técnico-económico de la metodología brasileña, sino que aportan evidencia para discutir su viabilidad normativa, técnica, económica, ambiental y social en el contexto chileno, particularmente para depósitos abandonados construidos con la metodología de aguas arriba.

6.2. Discusión normativa y de gobernanza

6.2.1. Brasil como modelo correctivo de alta exigencia

Brasil avanzó hacia un modelo de gobernanza correctiva tras los desastres de Mariana y Brumadinho, incorporando la descaracterización obligatoria en la Resolução ANM n.º 4/2019 y estableciendo un esquema tripartito ANM–FEAM–MPMG. Este esquema tiene tres características claves: (i) eliminación de la función hidráulica como obligación legal, (ii) plazos y cronogramas formalmente aprobados, con sanciones por incumplimiento, y (iii) supervisión ambiental y judicial permanente mediante TAC y reportes públicos.

Esta experiencia demuestra que es posible transformar presas de alto riesgo en estructuras geotécnicamente estables y ambientalmente rehabilitadas, siempre que exista un marco regulatorio que lo exija y fiscalice.

6.2.2. Canadá y Australia como referentes preventivos

Canadá y Australia, por su parte, no han adoptado la descaracterización masiva de presas aguas arriba, pero se han adelantado en términos de prevención de fallas. El programa TSM en Canadá exige sistemas de gestión documentados, auditorías externas trienales y reportes públicos de desempeño. Las guías ANCOLD en Australia obligan a categorizar las presas según consecuencias de falla, definir factores de seguridad mínimos y considerar escenarios de cambio climático.

Desde la perspectiva del GISTM, ambos países muestran un alto grado de alineamiento en gobernanza, gestión del riesgo y transparencia, mientras que Brasil se destaca en el eje de restauración ambiental, pero con rezagos relativos en transparencia y participación comunitaria.

6.2.3. Implicancias para Chile

Chile dispone de un marco robusto para depósitos activos e inactivos (Ley 20.551, DS 248/2007 y DS 41/2012), pero carece de mecanismos específicos para depósitos abandonados. Esto genera tres brechas: (i) vacío de responsabilidad sobre relaves huérfanos, (ii) ausencia de una figura equivalente a la descaracterización, centrada en la eliminación del riesgo hidráulico y (iii) limitada participación comunitaria y transparencia en el seguimiento de depósitos de relaves.

Los resultados del benchmarking sugieren que la adopción de un modelo híbrido sería recomendable: incorporar una figura legal de *descaracterización de depósitos de alto riesgo*, inspirada en Brasil, pero acompañada de exigencias de transparencia y auditorías independientes similares a las de Canadá y Australia.

6.3. Análisis comparativo de los casos brasileños

Tabla 27: Matriz comparativa técnica de los casos brasileños (síntesis para análisis transversal).

Categoría técnica	B1 Itaminas	Dos Alemães	Arêdes	Vigia	Barragem Central
Tipología del depósito	Tranque hidráulico (arena cicloneada + lama en cubeta).	Tranque hidráulico en valle; intercepta cauce natural.	Depósito de lavado en pasta; muro de estéril compactado.	Tranque hidráulico en cascada; depósito auxiliar arriba).	Tranque hidráulico de baja altura (depósito en depresión natural).
Método constructivo original	Recrecimientos del muro aguas arriba.	Dique inicial + recrecimientos del muro aguas arriba.	Recrecimientos del muro aguas arriba.	Recrecimientos del muro aguas arriba.	Estructura simple de un nivel; sin recrecimientos.
Escala del depósito (volumen / altura)	Volumen medio; altura media.	Muy alta escala; ~ 57 m y millones de m ³ .	Escala baja; ~ 15 m, volumen medio-bajo.	Escala media; operación condicionada por configuración en cascada.	Escala baja; volumen medio y altura baja.
Condicionantes geomorfológicos e hídricos	Emplazamiento relativamente aislado; control de escorrentías local.	Valle con cauce interceptado; mayor complejidad hidráulica.	No intercepta cauces relevantes; drenaje principalmente superficial.	Sistema en cascada; requiere coordinación con depósito Auxiliar.	Interacción hídrica acotada; foco en erosión y escorrentía superficial.
Estrategia principal de descaracterización	Reconformación del muro y taludes + drenaje + revegetación (PRAD).	Construcción de muro aguas abajo para eliminar recrecimientos aguas arriba; refuerzo de drenajes e instrumentación.	Desmonte casi total del muro y remoción total del relave; restitución geomorfológica y revegetación.	Remoción de recrecimientos del muro aguas arriba + excavación parcial; conversión final en pila estable con drenaje periférico.	Reconformación geotécnica del muro + drenaje superficial + cobertura vegetal; eliminación de la función de depósito.
Grado de remoción de relaves	Parcial (redistribución y conformación; sin retiro masivo).	Sin remoción total; estabilización por confinamiento y nueva geometría.	Total (retiro íntegro del relave y parte del muro).	Significativa (muro y relaves), con reconfiguración final.	Sin retiro masivo; estabilización <i>in situ</i> .
Manejo de drenaje (interno / superficial)	Refuerzo de drenaje superficial y subsuperficial; control de erosión.	Nuevo drenaje (filtros/tapete drenante) + drenaje superficial; vertedero para eventos extremos.	Drenaje superficial diseñado; sin drenaje interno original (compensado por nueva configuración).	Drenaje periférico completo + desvíos de aguas de contribución; control de escorrentías en cascada.	Drenaje superficial y protección contra erosión; monitoreo de aguas.

La comparación transversal de los cinco casos brasileños analizados permite identificar patrones comunes en su evolución constructiva, en los factores que motivan su descaracterización y en las estrategias técnicas seleccionadas para eliminar la función del depósito. Todos los casos corresponden a relaves de mineral de hierro, condición que implica mineralogías mayoritariamente ferruginosas y baja probabilidad de generación de drenaje ácido, concentrando la problemática socioambiental en aspectos de estabilidad física, erosión y manejo de escorrentías más que en procesos químicos.

Cuatro de las cinco estructuras (B1–Itaminas, Dos Alemães, Arêdes y Vigia) fueron originalmente construidas mediante recrecimientos del muro aguas arriba, técnica prohibida después de los cambios regulatorios implementados en Brasil tras el accidente de Brumadinho. Esta convergencia normativa explica que todos los proyectos deban ejecutar procesos de descaracterización, aunque con grados de complejidad técnica distintos. Barragem Central constituye una excepción relativa, pues corresponde a un tranque hidráulico de baja altura sin recrecimientos, donde la descaracterización se orienta principalmente a la reconfiguración del muro y al control de drenaje.

Pese a compartir este marco común, existen diferencias importantes en la tipología y escala. B1 y Dos Alemães son tranques hidráulicos clásicos construidos con arena cicloneada y relave fino depositado hidráulicamente. La principal diferencia radica en la escala: B1 es un depósito de volumen medio y emplazamiento relativamente aislado, mientras que Dos Alemães es una estructura de mayor altura y capacidad, ubicada en un valle que intercepta un cauce natural y con presencia de viviendas en la zona de autossalvamento (ZAS). Estas condiciones explican que en B1 sea suficiente la reconfiguración del muro, mientras que en Dos Alemães se requiera construir un nuevo muro aguas abajo para eliminar la condición de recrecimientos aguas arriba.

Arêdes presenta características particulares por tratarse de un depósito de relave en pasta, de baja altura y sin drenaje interno. En este caso, la estrategia de descaracterización es la más intensiva de los cinco, ya que contempla la remoción completa del relave y parte del muro, con restitución geomorfológica del terreno y traslado del material a otra instalación. Esto contrasta con B1, Vigia y Barragem Central, donde el relave permanece in situ y la estabilidad final se logra mediante reconfiguración y sistemas de drenaje.

Vigia constituye un caso de mayor sensibilidad socioambiental, dado que se ubica en una estructura en cascada junto a la Barragem Auxiliar do Vigia y en proximidad a comunidades como Mota y Pires. Aunque comparte el método original de recrecimientos del muro aguas arriba, su descaracterización debe coordinarse estrictamente con el cierre de la estructura auxiliar, y el componente social desempeña un rol determinante debido al historial de molestias por ruido, polvo y tránsito. Barragem Central, en cambio, presenta baja exposición poblacional y un potencial de daño medio, siendo un caso en el que la complejidad se concentra en la estabilidad física y el control de escorrentías.

Finalmente, pueden distinguirse dos enfoques predominantes de descaracterización: (i) aquellos basados en la estabilización del depósito mediante reconfiguración del muro, drenajes y revegetación (B1, Vigia, Barragem Central y en parte Dos Alemães), y (ii) aquellos basados en la remoción sustancial o total del material (Arêdes y, en ciertos aspectos, Vigia). La selección de cada enfoque depende de factores como el volumen del depósito, la disponibilidad de material de préstamo, la proximidad a comunidades, el potencial de daño asociado (DPA)³ y las condiciones regulatorias específicas.

³DPA: Daño Potencial Asociado; clasificación brasileña del nivel de impactos sociales, ambientales y económicos en caso de falla de la estructura, independiente de la probabilidad de ocurrencia.

6.4. Discusión técnica: viabilidad económica y operativa

6.4.1. Comparación de condiciones geotécnicas y climáticas

Las condiciones de Minas Gerais y las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso presentan diferencias y similitudes relevantes. Brasil opera en un clima tropical húmedo, con altas precipitaciones y suelos lateríticos, lo que favorece la saturación de los relaves y la generación de drenaje ácido. El norte chico de Chile presenta un clima semiárido, con precipitaciones medias significativamente menores y procesos dominados por la erosión eólica y la evaporación, pero sobre una base de alta sismicidad.

Estas diferencias implican que las medidas de drenaje y manejo hidrológico utilizadas en Brasil siguen siendo pertinentes en Chile, pero con énfasis en la captación de eventos extremos más que en flujos permanentes. La topografía más abrupta de Chile obliga a prestar especial atención a la reconfiguración geométrica y al control de erosión en laderas, aunque en los casos seleccionados se eligieron emplazamientos relativamente favorables. Finalmente, la sismicidad chilena introduce una exigencia adicional en el análisis de estabilidad, pero la meta de alcanzar factores de seguridad estáticos $\geq 1,3$ y pseudoestáticos adecuados es coherente con las guías nacionales.

La Figura 12 presenta la distribución porcentual de los costos unitarios promedio por etapa, obtenida a partir del análisis consolidado de los cinco casos brasileños completamente descritos. Estos porcentajes se derivan de los valores unitarios previamente calculados para cada categoría técnica (Tabla 14), permitiendo visualizar el peso relativo que cada etapa aporta al costo total estimado de descarterización. Como se observa, la categoría de maquinaria y movimiento de tierra domina ampliamente la estructura de costos, seguida por mantenimiento, personal, revegetación y las demás etapas de apoyo técnico y administrativo.

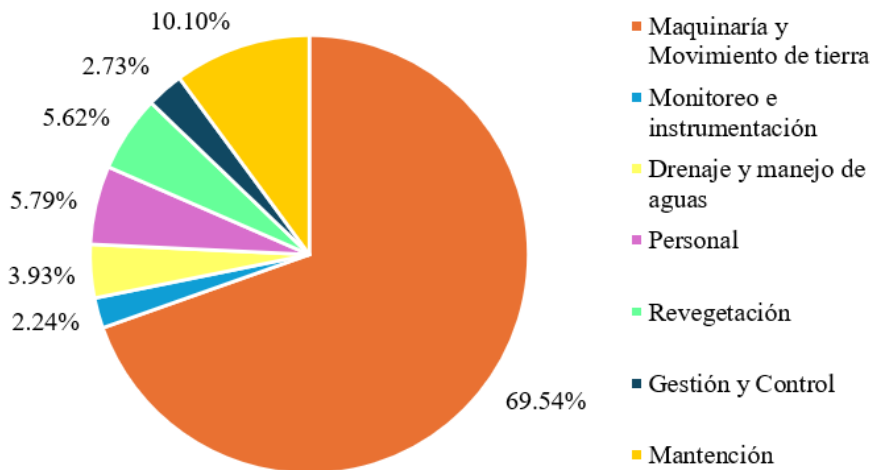


Figura 12: Distribución porcentual de los costos unitarios promedio por categoría.

La Figura 7 muestra la relación entre el volumen intervenido en cada uno de los cinco casos brasileños y su costo unitario de descarterización. Se observa una tendencia general decreciente,

donde los depósitos de mayor volumen tienden a presentar costos unitarios más bajos, mientras que los de menor escala concentran valores superiores. El ajuste potencial obtenido presenta un coeficiente de determinación moderado ($R^2 = 0.5974$), lo que evidencia que el volumen explica de manera significativa parte de la variabilidad observada en los costos unitarios y confirma la presencia de economías de escala en estos procesos. Si bien persiste cierta dispersión asociada a factores como accesibilidad, topografía, clima y exigencias ambientales, la tendencia general es consistente con los principios de ingeniería económica y con patrones ampliamente documentados en la literatura de estimación de costos (**cepciliterature**; AACE Internacional, 2016).

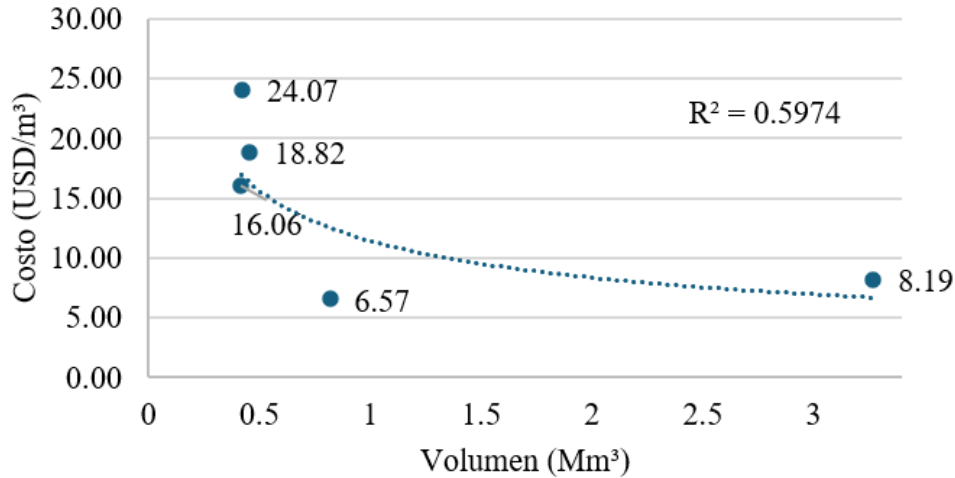


Figura 13: Relación entre el volumen intervenido y el costo unitario de descaracterización para los cinco casos brasileños analizados.

Según los principios de escalamiento de costos —descritos tradicionalmente mediante funciones potencia del tipo $C = k \cdot V^n$, donde $0 < n < 1$ — los proyectos de mayor magnitud tienden a distribuir más eficientemente sus **costos fijos**, reduciendo el costo unitario a medida que aumenta el volumen procesado (AACE Internacional, 2016; Brown, 1970). En el contexto de la descaracterización de depósitos de relaves, estos costos fijos incluyen componentes como la movilización de maquinaria pesada, la instalación de sistemas de drenaje, la supervisión técnica y los controles ambientales.

En depósitos de menor volumen, estas partidas representan una proporción significativamente mayor del presupuesto total, lo que deriva en **costos unitarios más elevados**. A su vez, las restricciones geotécnicas, la saturación de los relaves o la presencia de estructuras elevadas aguas arriba pueden incrementar sustancialmente la complejidad operativa, elevando aún más el costo por metro cúbico (International Council on Mining and Metals et al., 2020).

Por lo tanto, si bien la dispersión observada indica que el volumen no es el único determinante del costo unitario (influyen también la tipología, la geometría del reservorio, el método constructivo y la logística), el análisis confirma una tendencia estructural alineada con la teoría económica: *los proyectos de mayor escala logran menores costos unitarios debido al aprovechamiento de economías de escala, mientras que los de menor tamaño o mayor complejidad concentran costos unitarios superiores.*

6.4.2. Análisis de resultados de casos en Chile

Depósito Flora 1 (Andacollo)

El caso Flora 1 representa un depósito emplazado en un entorno urbano consolidado, con alta exposición a receptores sensibles y molestias asociadas principalmente a la generación de polvo y la interacción con infraestructura local. En este contexto, los resultados evidencian que la selección de alternativa está fuertemente condicionada por la **gestión del riesgo socioambiental** durante la ejecución, además del costo unitario final.

La **alternativa 1 (reconfiguración *in situ*)** presenta un costo unitario menor y una operación concentrada en movimiento de tierras, cobertura superficial y revegetación progresiva. Su principal ventaja es que reduce significativamente la logística externa (tránsito de camiones), disminuyendo el conflicto con el entorno urbano y el riesgo operacional asociado a transporte. No obstante, su desempeño depende críticamente de que el rediseño geomorfológico elimine el rol hidráulico del tranque y de que se implemente un control adecuado de escorrentías y erosión superficial, de manera análoga a lo observado en procesos de descaracterización progresiva en Brasil, donde la transformación de la estructura incluye control hidrológico, estabilidad transitoria y cierre progresivo.

La **alternativa 2 (remoción total y disposición externa)** se alinea con el enfoque de eliminación completa del pasivo, y resulta especialmente atractiva en un contexto urbano, dado que reduce a cero la permanencia del relave en el emplazamiento original. Sin embargo, el principal impulsor del costo es la cadena excavación–carguío–transporte–disposición, siendo particularmente sensible a la distancia de traslado y a la continuidad operacional de la flota. En Flora 1, la selección de un receptor cercano (Compañía Minera Dayton) permite mantener el costo dentro de un orden competitivo; aun así, la alternativa presenta mayor exigencia de control ambiental (polvo, material particulado, seguridad vial) y mayor exposición a interferencias externas (tráfico, restricciones horarias, convivencia con población).

En síntesis, Flora 1 muestra un caso donde la alternativa *in situ* tiende a ser más favorable en costo y control logístico, mientras que la remoción total aporta una reducción máxima del pasivo, justificable si la evaluación prioriza el control del riesgo urbano y la eliminación del conflicto territorial.

Depósito Cerro Negro 4 (Cabildo)

Cerro Negro 4 se emplaza en un entorno minero–rural, con conexión a quebradas activas y la cuenca del río La Ligua, caracterizada por estrés hídrico y sensibilidad frente a erosión y transporte de sedimentos finos. A diferencia de Flora 1, el riesgo dominante no es urbano, sino **hidrológico–geomorfológico**: erosión superficial del relave, arrastre de finos y potencial afectación aguas abajo.

Bajo este contexto, la **alternativa 1 (reconfiguración *in situ*)** adquiere un sentido técnico distinto: más que “cubrir”, el objetivo es **redefinir la geometría y el comportamiento hidrológico del depósito** para que opere como una forma estable integrada al relieve, con control de escorrentías, pendientes suaves, bermas y drenaje superficial. Los resultados muestran que el costo unitario se mantiene competitivo considerando el volumen del depósito, lo que es coherente con el principio observado en casos brasileños: a mayor escala, la redistribución interna puede reducir costos unitarios al aumentar productividad y diluir costos fijos de gestión, monitoreo y control (Agência Nacional de Mineração, 2019).

La **alternativa 2 (remoción completa con disposición interna)** refleja una ventaja relevante del caso Cerro Negro: al existir un complejo minero de mayor escala, el traslado del material puede definirse dentro de una logística controlada, evitando interferencias urbanas y reduciendo fricciones externas. Sin embargo, el costo se incrementa respecto a la reconfiguración porque incorpora excavación sostenida, transporte continuo y operación de disposición controlada en el receptor, además de las actividades de recuperación del sitio original. En términos técnicos, esta alternativa presenta mayor robustez al eliminar completamente la estructura original, pero a un costo unitario mayor, lo que se traduce en un trade-off claro entre costo y nivel de eliminación del pasivo.

En síntesis, Cerro Negro 4 demuestra que la alternativa *in situ* no es equivalente a la de Flora 1: aquí se justifica principalmente por control hidrológico y erosivo en cuenca, mientras que la remoción total se vuelve factible por la existencia de infraestructura minera receptora dentro del mismo sistema.

Depósito Ojancos 1 (Copiapó)

Ojancos 1 corresponde a un depósito de gran volumen emplazado en el entorno urbano-periurbano de Copiapó, cercano a infraestructura y con interacción con el río Copiapó (tramos secos). Este caso es particularmente exigente por su escala y por la coexistencia de: (i) sensibilidad urbana; (ii) condiciones desérticas con alta generación potencial de polvo; y (iii) fuerte penalización logística en caso de remoción total por distancias de transporte mayores.

La **alternativa 1 (reconfiguración *in situ*)** resulta operacionalmente coherente con lo observado en Brasil para estructuras de gran volumen: intervención progresiva, sectorización, solape entre movimiento de tierra y cierre progresivo, y control ambiental continuo. Los resultados muestran un costo unitario contenido, precisamente porque evita el componente más costoso del caso: el transporte externo. En términos de riesgo, la alternativa exige un diseño geomorfológico e hidrológico particularmente robusto, junto con control intensivo de polvo durante la ejecución y cierre progresivo para minimizar áreas expuestas.

En contraste, la **alternativa 2 (remoción total y disposición externa)** evidencia la principal conclusión del caso Ojancos: el costo total se vuelve altamente sensible a la distancia de transporte. En el análisis de sensibilidad, el cambio desde un receptor a 14 km (Planta Manuel Antonio Matta Ruiz) a uno a 17 km (Planta Pucobre) incrementa el costo total y unitario, confirmando que en depósitos de gran volumen el transporte domina el presupuesto cuando la disposición no es inmediata. Este comportamiento es consistente con experiencias comparables, donde el componente logístico puede transformar completamente la competitividad de una alternativa incluso con rendimientos y costos HM/HH constantes.

En síntesis, Ojancos 1 representa el caso donde la descaracterización total vía remoción presenta mayor dificultad económica relativa, y donde la alternativa *in situ* surge como la solución más viable para mantener costos unitarios competitivos sin renunciar a un cierre con control ambiental y estabilidad.

Comparación integrada entre los casos chilenos

Al comparar los tres casos, se observa que el costo unitario y la selección de alternativa dependen de tres “drivers” principales:

1. **Contexto territorial y receptores:** Flora 1 y Ojancos 1 presentan sensibilidad urbana (polvo, tránsito, convivencia con población), mientras que Cerro Negro 4 está dominado por sensibilidad hidrológica y erosiva en cuenca.
2. **Escala (volumen) y economía de flota:** en Cerro Negro 4 y Ojancos 1 la escala permite operar con múltiples frentes y solapar etapas, lo que ayuda a contener costos unitarios en alternativas *in situ*.
3. **Logística de disposición (distancia y receptor):** el componente transporte se vuelve determinante en alternativas de remoción total. En Flora 1, una distancia corta permite mantener competitividad; en Ojancos 1, distancias mayores penalizan fuertemente el costo total, y el análisis de sensibilidad confirma la dominancia de este factor.

Desde una perspectiva de decisión, los resultados sugieren que: (i) la reconfiguración *in situ* es preferible cuando el objetivo es controlar costo unitario y minimizar logística externa; (ii) la remoción total se justifica cuando existe un receptor cercano o interno al complejo (Cerro Negro 4), o cuando la evaluación prioriza eliminar completamente el pasivo en contextos urbanos (Flora 1), aceptando el incremento de costo.

Comparación de Chile con los casos brasileños

La comparación con Brasil permite contextualizar y validar el comportamiento general observado en los casos chilenos. En los casos brasileños analizados, la descaracterización se caracteriza por: planificación por etapas, control hidrológico (drenaje, desvíos, rebaixamento cuando aplica), monitoreo y control ambiental continuo, y cierre progresivo con estabilización superficial y revegetación. Asimismo, la evidencia en Brasil sugiere una tendencia de **economías de escala**, donde depósitos mayores tienden a reducir costos unitarios, mientras que estructuras pequeñas o con restricciones particulares pueden presentar costos unitarios elevados.

En Chile, este patrón se replica en parte: alternativas *in situ* en depósitos de gran volumen (Cerro Negro 4 y Ojancos 1) logran mantener costos unitarios relativamente contenidos al evitar transporte externo y al distribuir costos fijos. En contraste, la remoción total muestra una sensibilidad significativamente mayor a logística y distancia, lo cual coincide con el hecho de que, en Brasil, cuando se ejecutan remociones masivas la planificación del receptor y la cadena de transporte son determinantes del costo final.

Finalmente, la transferencia metodológica desde Brasil hacia Chile no implica replicar procedimientos idénticos, sino **replicar la lógica técnica**: intervención progresiva, diseño para estabilidad transitoria y final, control de aguas y control ambiental durante todo el proyecto, y cierre progresivo. Esta coherencia metodológica fortalece la aplicabilidad del enfoque de descaracterización brasileño como base para proponer escenarios técnicamente consistentes en depósitos chilenos abandonados.

6.4.3. Sensibilidad y priorización de inversiones

Desde una perspectiva de política pública, los resultados sugieren que los programas piloto deberían priorizar depósitos de mayor volumen y cercanos a centros poblados, maximizando los beneficios de escala y reducción de riesgos. La combinación de financiamiento estatal y mecanismos de garantía ambiental similares a los *Financial Assurance* canadienses o *Rehabilitation Bonds* australianos haría viable la intervención progresiva de depósitos abandonados.

6.5. Discusión integrada de los resultados ambientales y sociales

La síntesis de los resultados ambientales y sociales obtenidos a partir de los cinco casos brasileños analizados permite establecer un marco comparativo robusto para evaluar la viabilidad y los potenciales efectos de aplicar procesos de descaracterización en el contexto chileno. En términos ambientales, los indicadores recopilados muestran que la descaracterización genera beneficios sostenidos y medibles, particularmente en proyectos emplazados en zonas tropicales y subtropicales altamente meteorizadas. Los casos brasileños presentan reducciones significativas del potencial erosivo (70–80 %), aumentos consistentes de la cobertura vegetal (55–65 %) y factores de seguridad física iguales o superiores a 1.3, valores que se alinean con las exigencias normativas de cierres mineros tanto en Brasil como en Chile. Adicionalmente, se observa una disminución de infiltraciones superficiales (40–50 %), una reducción de material particulado PM₁₀ (65–75 %) y mejoras en la calidad del agua superficial debido a la disminución de escurrimiento ácido y metales disueltos, con eficiencias cercanas al 80 %. Estos resultados se encuentran sistematizados en la Tabla 25.

La evidencia recopilada también indica que la estabilización hidrológica posterior a la intervención se alcanza en un rango de 18 a 24 meses, parámetro que constituye una referencia útil para las condiciones chilenas, especialmente en zonas con estaciones secas prolongadas y precipitaciones concentradas en periodos reducidos. No obstante, la extrapolación directa presenta limitaciones debido a las diferencias climáticas y geológicas entre ambos países. Mientras Brasil opera mayoritariamente en un régimen húmedo que favorece la rápida revegetación y la consolidación de taludes, Chile presenta regiones semiáridas y áridas donde la disponibilidad hídrica, la salinidad y la presencia de minerales sulfurados pueden modificar la magnitud y velocidad de los impactos ambientales observados. Por ello, si bien los rangos provenientes de Brasil constituyen metas razonables para estudios preliminares, su validación en Chile requiere ajustes basados en ingeniería de detalle, modelación local y monitoreo contextual.

En materia social, los resultados compilados en la Tabla 26 permiten identificar beneficios concretos atribuibles a la descaracterización. En Brasil, cada proyecto generó entre 150 y 200 empleos temporales, con un 70–85 % de mano de obra local, lo que extrapolado a la realidad chilena corresponde aproximadamente a 100–160 empleos por faena con una meta de participación local en torno al 80 %. La duración promedio del empleo temporal (18–24 meses) coincide con la fase activa de intervención geomorfológica e hidrológica. Asimismo, las encuestas aplicadas en Brasil después del cierre registran mejoras en la percepción comunitaria del orden del 65 %, asociadas a la eliminación del riesgo estructural y químico, la reducción de ruidos y emisiones de polvo, y la recuperación territorial posterior al cierre.

Los resultados también muestran incrementos del valor de uso del suelo del orden del 30–35 % y tasas de reutilización territorial del 55–70 %, lo que sugiere una mejora sustantiva en la

disponibilidad de áreas para fines productivos, ambientales o recreativos una vez concluido el proceso de descaracterización. En el caso chileno, estos indicadores apuntan a un aumento esperado del valor del suelo cercano al 25–30 % y a una reutilización efectiva superior al 60 %, siempre condicionados por la localización geográfica, la conectividad vial y las expectativas de desarrollo territorial.

Integrando ambas dimensiones, los resultados ambientales y sociales muestran que la descaracterización posee una doble capacidad de impacto: por un lado, mejora indicadores objetivos de estabilidad física, calidad ambiental y control de riesgos; y por otro, genera beneficios territoriales y socioeconómicos medibles, reforzados por programas de educación, comunicación y participación comunitaria. El análisis de los cinco casos brasileños evidencia que los mejores desempeños socioambientales se alcanzan cuando existe simultáneamente: (i) un programa estructurado de gestión ambiental con monitoreo permanente de agua, aire, ruido, fauna y residuos; (ii) una estrategia sistemática de educación e información ambiental que contribuya a reducir la percepción de riesgo y aumentar la confianza comunitaria; y (iii) un enfoque claro de empleo local y reutilización de territorio en la etapa posterior al cierre.

Finalmente, aunque la extrapolación al contexto chileno presenta desafíos derivados de la variabilidad climática, la menor disponibilidad de agua y la presencia de mineralogías distintas (especialmente sulfuros), los indicadores provenientes de Brasil constituyen un marco robusto para orientar metas preliminares y definir escenarios técnicos de diseño. En conjunto, los resultados ambientales y sociales analizados muestran que la descaracterización puede aportar mejoras significativas a la seguridad, la calidad ambiental y el desarrollo territorial, siempre que sea acompañada de una planificación adecuada, monitoreo permanente y mecanismos de participación coherentes con las necesidades locales.

6.6. Limitaciones del estudio

6.7. Limitaciones del proceso de extrapolación de costos

Los resultados obtenidos en esta investigación deben interpretarse considerando una serie de limitaciones asociadas al proceso de extrapolación de costos, a la disponibilidad y nivel de detalle de la información, y al carácter conceptual de las alternativas evaluadas para los casos chilenos.

En primer lugar, la estimación de costos para los depósitos chilenos se basa en una metodología de carácter comparativo y conceptual, construida a partir del análisis de proyectos de descaracterización ejecutados en Brasil. Si bien la metodología empleada incorpora un enfoque *bottom-up*, utilizando rendimientos de maquinaria, costos de hora máquina (HM) y hora hombre (HH), así como el dimensionamiento explícito de flotas y duraciones operacionales, los valores adoptados representan órdenes de magnitud y no reemplazan estudios de ingeniería de detalle.

Asimismo, los rendimientos y costos unitarios considerados provienen de antecedentes técnicos y económicos asociados a proyectos desarrollados bajo condiciones propias del contexto brasileño, particularmente en términos de disponibilidad de equipos, organización de faenas, productividad laboral y prácticas operacionales. A pesar de que se realizaron ajustes temporales y se mantuvo coherencia interna entre los distintos casos chilenos, persisten incertidumbres derivadas de diferencias en costos energéticos, estructura salarial, eficiencia logística y restricciones normativas entre ambos países.

Otra limitación relevante se relaciona con la simplificación inherente al modelamiento operacional. Si bien se definieron flotas específicas de maquinaria y secuencias operacionales diferenciadas para cada depósito (Flora 1, Cerro Negro 4 y Ojancos 1), no se incorporaron en detalle aspectos tales como detenciones no programadas, restricciones climáticas puntuales, variaciones geotécnicas locales del relave, ni interferencias operacionales propias de faenas activas o entornos urbanos complejos. Estos factores pueden influir de manera significativa en los costos reales y en la duración efectiva de los proyectos.

En el caso de las alternativas de remoción total, la estimación de costos es particularmente sensible a la distancia de transporte y a las condiciones de la ruta, variables que fueron abordadas mediante escenarios representativos y análisis de sensibilidad, pero que en la práctica requieren levantamientos específicos de trazado, pendientes, capacidad vial y restricciones de circulación. Por ello, los resultados deben interpretarse como una comparación relativa entre alternativas más que como valores absolutos definitivos.

Finalmente, la extrapolación de la experiencia brasileña al contexto chileno no implica la replicación directa de procedimientos constructivos idénticos, sino la transferencia de una lógica metodológica basada en la intervención progresiva, el control de estabilidad transitoria, la gestión de aguas y el cierre escalonado del pasivo. En este sentido, las alternativas propuestas constituyen escenarios técnicamente consistentes y comparables, pero su implementación real requiere necesariamente el desarrollo de estudios de ingeniería básica y de detalle, así como evaluaciones ambientales específicas para cada emplazamiento.

En segundo término, la información ambiental y social disponible para los casos brasileños, si bien oficial, presenta heterogeneidad en su nivel de detalle, extensión temporal y formato. Algunos proyectos incluyen series de monitoreo completas (calidad de agua, ruido, fauna), mientras que otros sólo entregan matrices cualitativas o evaluaciones simplificadas de impactos. Esta disparidad limita la posibilidad de construir indicadores totalmente homogéneos entre casos y afecta la capacidad de establecer comparaciones cuantitativas estrictas.

Asimismo, la extrapolación de los resultados ambientales y sociales al contexto chileno se realizó mediante ajustes simplificados de régimen climático, geológico y de accesibilidad. La literatura técnica indica que los procesos de erosión, revegetación, infiltración y movilidad química de los relaves poseen un fuerte control por variables locales como precipitación efectiva, disponibilidad hídrica, mineralogía (particularmente sulfuros), conductividad hidráulica de los materiales y temperatura media anual. Dado que Brasil y Chile presentan contrastes significativos en estos factores, la magnitud de los impactos observados en Brasil puede diferir en escenarios chilenos, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde los tiempos de estabilización y recuperación ecológica tienden a ser más prolongados.

A nivel social, los programas de educación, participación comunitaria y percepción de riesgo analizados corresponden a comunidades brasileñas con una convivencia histórica con la minería y marcos regulatorios específicos del país (como la DN COPAM 214/2017). La replicabilidad de estos efectos en territorios chilenos depende de la estructura social local, del nivel de exposición histórica al riesgo minero y de la capacidad institucional de sostener procesos de comunicación y participación temprana. En consecuencia, los indicadores sociales extrapolados deben considerarse como referencias aproximadas y no como valores determinísticos.

Finalmente, tanto la evaluación económica como la socioambiental fueron elaboradas a partir de un número limitado de casos con información oficial disponible (cinco brasileños y tres chilenos),

lo cual restringe la representatividad estadística de los resultados. Aspectos específicos, como la respuesta química particular de los relaves, la presencia de drenaje ácido, los efectos de metales en solución, las variaciones geotécnicas del terreno y la interacción con comunidades locales, requieren estudios detallados caso a caso para su correcta caracterización y no pueden generalizarse únicamente a partir de los ejemplos analizados.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero sí establecen los márgenes dentro de los cuales deben interpretarse, y refuerzan la necesidad de complementar este estudio con análisis site-specific durante las etapas posteriores de diseño, ingeniería y planificación territorial.

6.8. Implicancias para la política pública y la gestión de relaves en Chile

Los hallazgos permiten proponer varias líneas de acción: (i) creación de una figura legal de *descaracterización de depósitos de relaves* aplicable inicialmente a depósitos abandonados aguas arriba; (ii) definición de mecanismos de financiamiento mixtos entre Estado y sector privado; (iii) incorporación formal de la participación comunitaria y la transparencia siguiendo los estándares del GISTM; (iv) priorización territorial basada en riesgo mediante análisis multicriterio; y (v) articulación interinstitucional entre SERNAGEOMIN, el Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Minería y gobiernos regionales, inspirada en el modelo tripartito ANM-FEAM-MPMG.

Un programa piloto de descaracterización de algunos depósitos seleccionados permitiría ajustar instrumentos técnicos, normativos y financieros antes de una implementación a mayor escala.

7. Conclusiones

La presente memoria tuvo como objetivo analizar la aplicabilidad del concepto de descaracterización de depósitos de relaves, desarrollado e implementado en Brasil tras los eventos de Brumadinho, al contexto chileno, con especial énfasis en depósitos abandonados construidos aguas arriba. Para ello, se desarrolló un enfoque metodológico de carácter comparativo e integrado, abordando dimensiones normativas, técnicas, económicas, ambientales y sociales, a partir del estudio de casos reales de Brasil y su contraste con depósitos representativos en Chile.

En una primera etapa, el análisis de los casos brasileños permitió identificar que la descaracterización constituye una estrategia integral de reducción del riesgo, cuyo éxito no depende únicamente de soluciones de ingeniería, sino de la existencia de un marco regulatorio robusto, una fiscalización efectiva y una clara asignación de responsabilidades. La experiencia brasileña evidencia que la eliminación progresiva de depósitos aguas arriba se ha consolidado como una política pública con respaldo normativo, incorporando criterios de seguridad, planificación territorial y aceptación social. En contraste, el análisis del marco chileno permitió constatar que, si bien existen normativas avanzadas para relaves activos y en proceso de cierre, persiste una brecha significativa en la gestión de depósitos abandonados, lo que dificulta la implementación de estrategias sistemáticas de mitigación del riesgo en pasivos mineros históricos.

Desde el punto de vista económico, uno de los principales aportes de esta investigación fue la estimación y comparación de órdenes de magnitud de costos asociados a la descaracterización. Para los casos chilenos analizados, se desarrollaron presupuestos conceptuales que permitieron evaluar distintas alternativas de intervención, tales como la reconfiguración geométrica *in situ* y la remoción total con redistribución en depósitos receptores. Los resultados muestran que los costos unitarios estimados en Chile se sitúan aproximadamente entre 2,1 y 6,8 USD/m³, dependiendo del volumen del depósito, la alternativa técnica seleccionada, las distancias de transporte y las condiciones logísticas del entorno. Estos valores resultan significativamente inferiores a los costos unitarios observados en los casos brasileños, lo que se explica principalmente por las diferencias en escala, complejidad operativa, alcance de las obras y criterios normativos aplicados en cada país.

En términos técnicos, el estudio evidenció que las soluciones consideradas para la descaracterización, tales como la reperfilación de taludes, el manejo de drenajes, la estabilización superficial y la revegetación, son técnicamente viables en el contexto chileno, siempre que se adapten a condiciones locales como la sismicidad, la variabilidad climática y las características geotécnicas de cada sitio. Asimismo, se identificó que la elección de la alternativa óptima no depende exclusivamente del costo, sino que debe considerar criterios de seguridad a largo plazo, disponibilidad de depósitos receptores, restricciones territoriales y potenciales impactos ambientales y sociales.

Desde la dimensión ambiental y social, los resultados indican que la descaracterización presenta un alto potencial de beneficios, particularmente en términos de reducción del riesgo asociado a fallas catastróficas, control de procesos erosivos, disminución de la percepción de amenaza en comunidades cercanas y recuperación progresiva del territorio. Si bien estos beneficios no fueron cuantificados económicamente en esta investigación, su incorporación resulta clave para una evaluación integral de la viabilidad de este tipo de intervenciones, especialmente en zonas con presencia de población o actividades productivas aguas abajo de los depósitos.

No obstante, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando ciertas limitaciones. El análisis se basa en un número acotado de casos y en información secundaria con distintos niveles de detalle, lo que introduce incertidumbre en las estimaciones de costos y en la caracterización de los impactos. Asimismo, los presupuestos desarrollados corresponden a estimaciones conceptuales, por lo que no sustituyen estudios de ingeniería de detalle ni evaluaciones ambientales específicas de cada sitio. Adicionalmente, la transferencia de experiencias internacionales al contexto chileno requiere cautela, dado que existen diferencias relevantes en los marcos institucionales, territoriales y socioambientales.

A partir de lo anterior, esta investigación abre diversas líneas de proyección futura. Resulta especialmente relevante avanzar hacia estudios más aplicados, mediante el desarrollo de proyectos piloto de descaracterización en depósitos abandonados priorizados, que permitan validar en terreno los supuestos técnicos y económicos aquí planteados. Asimismo, futuras investigaciones podrían profundizar en la modelación de estabilidad física posterior a la intervención, en la evaluación de escenarios hidrológicos y de cambio climático, y en la valoración económica de los beneficios ambientales y sociales asociados a la recuperación de estos pasivos. En el ámbito normativo, se identifica como línea prioritaria la discusión de instrumentos regulatorios específicos que permitan abordar de manera sistemática la gestión de depósitos abandonados en Chile.

En conclusión, los resultados de esta memoria permiten afirmar que la descaracterización constituye una alternativa técnicamente viable y económicamente abordable para la gestión de relaves abandonados en Chile, siempre que se adapte a las condiciones locales y se inserte en un marco regulatorio adecuado. La adopción progresiva de esta metodología podría generar beneficios significativos para el país, tales como la reducción del riesgo para comunidades y ecosistemas, la recuperación de territorios impactados por la actividad minera y el fortalecimiento de una gestión de relaves alineada con estándares internacionales de seguridad y sostenibilidad.

8. Referencias bibliográficas

- AACE International. (2016). Cost estimate classification system—As applied in engineering, procurement, and construction for the process industries. https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf
- Agência Brasil. (2024). Brasil reduz número de barragens a montante em processo de descaracterização. <https://agenciabrasil.ebc.com.br>
- Agência Nacional de Mineração. (2019). Resolução n.º 4, de 15 de fevereiro de 2019: Estabelece medidas cautelares de regulação destinadas a garantir a estabilidade de barragens de mineração. <https://www.gov.br/anm/pt-br>
- Australian National Committee on Large Dams. (2019). *Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure*. ANCOLD.
- Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. *Waste Management & Research*, 28(7), 651-660. <https://doi.org/10.1177/0734242X10365322>
- Blight, G. E. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press.
- Brown, R. L. (1970). *Estimating and Scaling Industrial Plant Costs*. Industrial Engineering Press.
- Cambridge, M., & Shaw, R. (2019). Brumadinho dam disaster: Risk, accountability and the future of tailings management. *Mining Technology*, 128(4), 201-214.
- Canadian Dam Association. (2019). Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams.
- Chemical Engineering Magazine. (2024). Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) – 2021 to 2024 Update [Projected value for July 2024: 745].
- CSN Mineração S.A. (2022a). *Projeto de educação e informação ambiental da Barragem do Vigia* (inf. téc.) [Programa socioambiental elaborado em atendimento ao Termo de Compromisso; maio de 2022]. Ambiente Vivo Engenharia. Ouro Preto, MG, Brasil.
- CSN Mineração S.A. (2022b). *Projeto de educação e informação ambiental da Barragem do Vigia* (inf. téc.) [Programa socioambiental elaborado em atendimento ao Termo de Compromisso]. Ambiente Vivo Engenharia. Ouro Preto, MG, Brasil.
- CSN Mineração S.A. (2022c). Relatório de impacto ambiental da descaracterização da Barragem do Vigia [Estudo ambiental elaborado pela Fonntes Geotécnica Ltda.; dezembro de 2022].
- CSN Mineração S.A. (2022d). Relatório de impactos ambientais associados à descaracterização da Barragem do Vigia [Estudo ambiental elaborado pela Fonntes Geotécnica Ltda.].
- CSN Mineração S.A. (2023). Cronograma de descaracterização da Barragem do Vigia.
- Fastmarkets. (2019). Brazil to decommission 84 upstream tailings dams under new regulation [Boletín técnico]. <https://www.fastmarkets.com>
- Fonntes. (2022a). *Nota Técnica n 04/2022 – Prazo para descaracterização de barragens a montante* (inf. téc.). Fonntes Geotécnica Ltda.
- Fonntes. (2022b). *Relatório de Impacto Ambiental – Descaracterização da Barragem do Vigia* (inf. téc.) [Documento fornecido por CSN Mineração]. Fonntes Geotécnica Ltda.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Gerdau Açominas S.A. (2022a). *Cronograma de descaracterização da Barragem dos Alemães* [Documento técnico de planificación]. Gerdau Açominas S.A. Ouro Preto, MG.
- Gerdau Açominas S.A. (2022b). Plano de impacto ambiental do projeto de descaracterização da Barragem dos Alemães.

- Gerdau Açominas S.A. (2022c). *Projeto de descaracterização do método construtivo de montante para jusante da Barragem de Rejeitos dos Alemães* [Projeto de engenharia]. Gerdau Açominas S.A. Ouro Preto, MG.
- Gerdau Açominas S.A. (2022d). *Projeto de educação e informação ambiental da Barragem dos Alemães* (inf. téc.) [Programa socioambiental elaborado em atendimento ao Termo de Compromisso]. Bridge Comunicação e Desenvolvimento Social. Ouro Preto, MG, Brasil.
- Gerdau Açominas S.A. (2022e). Relatório de impactos ambientais associados à descaracterização da Barragem dos Alemães.
- Gerdau Açominas S.A. (2022f). *Termo de compromisso referente ao projeto de descaracterização da Barragem dos Alemães* [Documento institucional]. Gerdau Açominas S.A. Ouro Preto, MG.
- Gerdau Açominas S.A. (2023a). *Barragem dos Alemães: maciço de adequação para jusante, acompanhamento de obras e descaracterização do método construtivo* [Relatório técnico de auditoria e acompanhamento de obras (ATO), elaborado pela DAM Projetos de Engenharia; documento MMB-1H01R.10-G-4603]. Gerdau Açominas S.A. Ouro Preto, MG.
- Gerdau Açominas S.A. (2023b). *Manifestação e relatório técnico de cumprimento do Termo de Compromisso: descaracterização da Barragem dos Alemães* [Documento técnico submetido à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), Processo SEI n.º 2090.01.0001297/2022-69]. Gerdau Açominas S.A. Ouro Preto, MG.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Índice de Preços ao Produtor Industrial (IPP) – Construção, Julho 2024. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. (2024). Boletín del Índice de Costos de la Construcción (ICC), Julio 2024. <https://www.ine.cl>
- International Commission on Large Dams & United Nations Environment Programme. (2001). *Tailings dams: Risk of dangerous occurrences—Lessons learnt from practical experiences* (N.º 121) [Bulletin 121]. ICOLD.
- International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme & Principles for Responsible Investment. (2020). *Global industry standard on tailings management*. ICMM, UNEP y PRI. <https://globaltailingsreview.org>
- Itaminas Comércio de Minérios S.A. (2022a). *Projeto executivo de educação e informação ambiental da Barragem B1* (inf. téc.) [Programa ambiental elaborado em atendimento ao Termo de Compromisso firmado com o Ministério Público]. CERN – Consultoria e Empreendimentos de Recursos Naturais Ltda. Sarzedo, MG, Brasil.
- Itaminas Comércio de Minérios S.A. (2022b). Relatório de Avaliação de Impactos ambientais da Barragem B1.
- Itaminas Comércio de Minérios S.A. (2024). *Relatório mensal de acompanhamento das obras de adequação da Barragem B1: Abril de 2024* [Relatório técnico mensal elaborado no âmbito do Termo de Compromisso firmado com o Ministério Público do Estado de Minas Gerais; relatório MLF-RT-ITAB1-048B-2024]. Itaminas Comércio de Minérios S.A.
- Itaminas Comércio de Minérios S.A. (2025). *Relatório técnico-financeiro de recursos aplicados na descaracterização da Barragem B1* [Relatório apresentado ao Ministério Público do Estado de Minas Gerais em cumprimento ao Termo de Compromisso; atualização fevereiro de 2025]. Itaminas Comércio de Minérios S.A.
- Itaminas Mineração S.A. (2025). *Relatório mensal de acompanhamento das obras de adequação da Barragem B1: Junho de 2025* [Relatório técnico de auditoria e acompanhamento geotécnico]. Itaminas Mineração S.A.
- Mineração, B. M. A. / S. (2023). Projeto de Educação e Informação Ambiental – Barragem Aredes [Relatório técnico].

- Mining Association of Canada. (2019). Towards Sustainable Mining: Tailings Management Protocol. <https://mining.ca>
- Ministerio de Minería. (2007). Decreto Supremo N 248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.
- Ministerio de Minería. (2012). Decreto Supremo N 41: Reglamento para la aplicación de la Ley N 20.551 sobre cierre de faenas e instalaciones mineras.
- Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável & SAFM Mineração Ltda. (2022). Termo de Compromisso para a descaracterização das barragens Central e Aredes.
- Ministério Público Federal, Ministério Público de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Agência Nacional de Mineração & CSN Mineração S.A. (2022). Termo de Compromisso para a descaracterização das barragens Vigia e Auxiliar do Vigia.
- Ministério Público Federal, Ministério Público de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Agência Nacional de Mineração & SAFM Mineração Ltda. (2022). Termo de Compromisso para a descaracterização das barragens Central e Aredes.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846-852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- S.A., G. A. (2023). *Projeto Executivo de Descaracterização – Barragens dos Alemães* (inf. téc.). Gerda AÇominas S.A. Ouro Preto, MG, Brasil.
- SAFM Mineração Ltda. (2022a). *Projeto de descaracterização das barragens Central e Aredes* (inf. téc.) [Projeto técnico executivo submetido aos órgãos ambientais competentes]. SAFM Mineração Ltda. Itabirito, MG, Brasil.
- SAFM Mineração Ltda. (2022b). Relatório de avaliação de impactos ambientais das barragens Central e Aredes.
- SAFM Mineração Ltda. (2022c). *Relatório de avaliação de impactos das atividades de descaracterização da Barragem Arêdes* [Relatório técnico ambiental; processo SEI 2090.01.0001353/2022-12; novembro de 2022]. SAFM Mineração Ltda.
- SAFM Mineração Ltda. (2022d). *Relatório de avaliação do projeto de descaracterização da Barragem Arêdes* [Relatório técnico de avaliação elaborado pela MLF Geomecânica; código MLF-RT-SFM-001-2022; abril de 2022]. SAFM Mineração Ltda.
- SAFM Mineração Ltda. (2023). *Projeto de educação e informação ambiental das barragens Central e Aredes* (inf. téc.) [Programa ambiental elaborado em atendimento ao Termo de Compromisso firmado com o Ministério Público]. Brandt Meio Ambiente Ltda. Itabirito, MG, Brasil.
- SAFM Mineração Ltda. (2025a). *Relatório técnico trimestral do avanço do processo de descomissionamento da Barragem Aredes* [Relatório técnico trimestral; fevereiro de 2025]. SAFM Mineração Ltda. Itabirito, MG.
- SAFM Mineração Ltda. (2025b). *Relatório trimestral de manutenção dos recursos necessários à descaracterização da Barragem Central* [Atendimento ao Termo de Compromisso, obrigação 4.1, fevereiro de 2025]. SAFM Mineração Ltda. Itabirito, MG, Brasil.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2025). Catastro Nacional de Depósitos de Relaves – Actualización octubre 2025. <https://www.sernageomin.cl>
- Statum Geotecnia Ltda. (2022). *Parecer técnico inicial socioambiental da Barragem dos Alemães* (inf. téc.) [Auditoria técnica especializada e independente para acompanhamento das obras de descaracterização]. Statum Geotecnia Ltda. Ouro Preto, MG, Brasil.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3.^a ed.). John Wiley & Sons.

Vale S.A. (2024). Relatório de Descaracterização de Barragens – Atualização 2024. <https://www.vale.com>

Wise, R. (2016). The Mariana dam disaster: A toxic legacy of Brazilian mining. *Ecologist*, 46(2), 12-18.