Gestión Operativa y Mantenimiento de Depósitos de Relaves

Módulo 1

Definiciones y Tipos de Depósitos de Relaves

- **Alejandro Villalobos**

alejandro.villalobos.figueroa@ua.cl
alejandro.villalobos@rheomining.cl

RelaveNet
A Community of Excellence

Indice Temático



- Definición de relaves: Qué son y cómo se generan.
- Clasificación de los depósitos de relaves: Tipos y características (depósitos convencionales, en seco, relaves espesados, en pasta, y filtrados).
- Comparación de los distintos tipos de depósitos según criterios operacionales, económicos y ambientales.
- Causas principales de los colapsos de los TFS
- Revisión de normativas y estándares internacionales sobre gestión de depósitos de relaves.

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

Importancia Estratégica de la Gestión de Relaves en la Minería Moderna

La industria minera genera miles de millones de toneladas de relaves al año, producto de la baja ley de los minerales procesados.

La acumulación histórica de relaves en condiciones deficientes ha provocado accidentes catastróficos, generando impactos ambientales irreversibles, pérdidas humanas y perjuicios reputacionales para la industria.

"La gestión de relaves no es una externalidad operativa, sino una dimensión estratégica de la sostenibilidad minera".

El auge de nuevas tecnologías extractivas, junto con normativas ambientales más estrictas, ha llevado a una transformación en la forma en que las compañías conciben, diseñan, operan y cierran sus depósitos de relaves. El tratamiento y disposición de relaves está directamente relacionado con:

- Gestión de riesgos operacionales
- Responsabilidad social y ambiental
- Disponibilidad de agua y energía
- Seguridad física y estructural de las instalaciones

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

Ciclo de Vida de un TSF: Visión Sistémica para la Gestión Integral del Riesgo

Un depósito de relaves (TSF) no es una obra pasiva ni estática: atraviesa distintas etapas funcionales, cada una con desafíos técnicos, ambientales y legales.

El enfoque moderno propone una visión sistémica y de ciclo de vida completo, donde el diseño debe considerar desde la etapa de planificación minera hasta la post-clausura.

Etapas del ciclo de vida de un TSF:

- Diseño conceptual e ingeniería básica
- Construcción progresiva o escalonada
- Operación y monitoreo continuo
- Cierre técnico y post-cierre con monitoreo ambiental prolongado

Cada fase requiere un enfoque integrado de:

- Evaluación geotécnica
- Gestión de aguas
- Control de estabilidad física y química
- Planes de contingencia y emergencia
- Consideración de aspectos sociales y comunitarios

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

Ciclo de Vida de un TSF: Visión Sistémica para la Gestión Integral del Riesgo

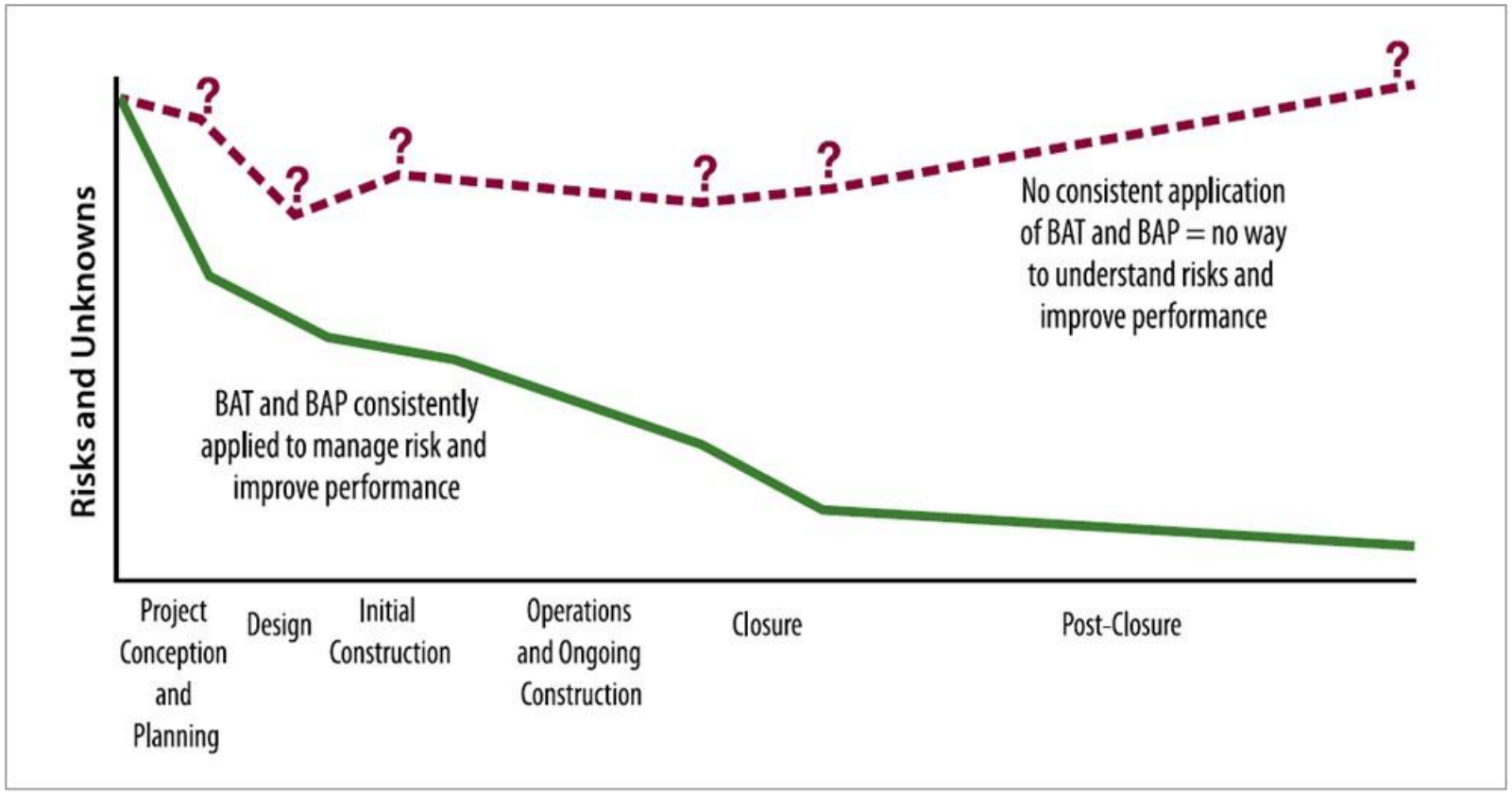


Figura 2: Importancia de las decisiones en el ciclo de vida de un TSF
2017 The Mining Association of Canada

La Figura captura la importancia de tomar buenas decisiones en las primeras etapas del ciclo de vida de una instalación de relaves, pero no considera las prácticas de contabilidad financiera utilizadas en la planificación minera, en particular la aplicación de tasas de descuento a los costos a largo plazo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Definición técnica y operativa de relaves

Los relaves son los residuos sólidos y líquidos resultantes del proceso de concentración de minerales. Representan el material que no posee valor económico **inmediato** y que ha sido sometido a procesos como molienda, flotación, lixiviación o separación física.

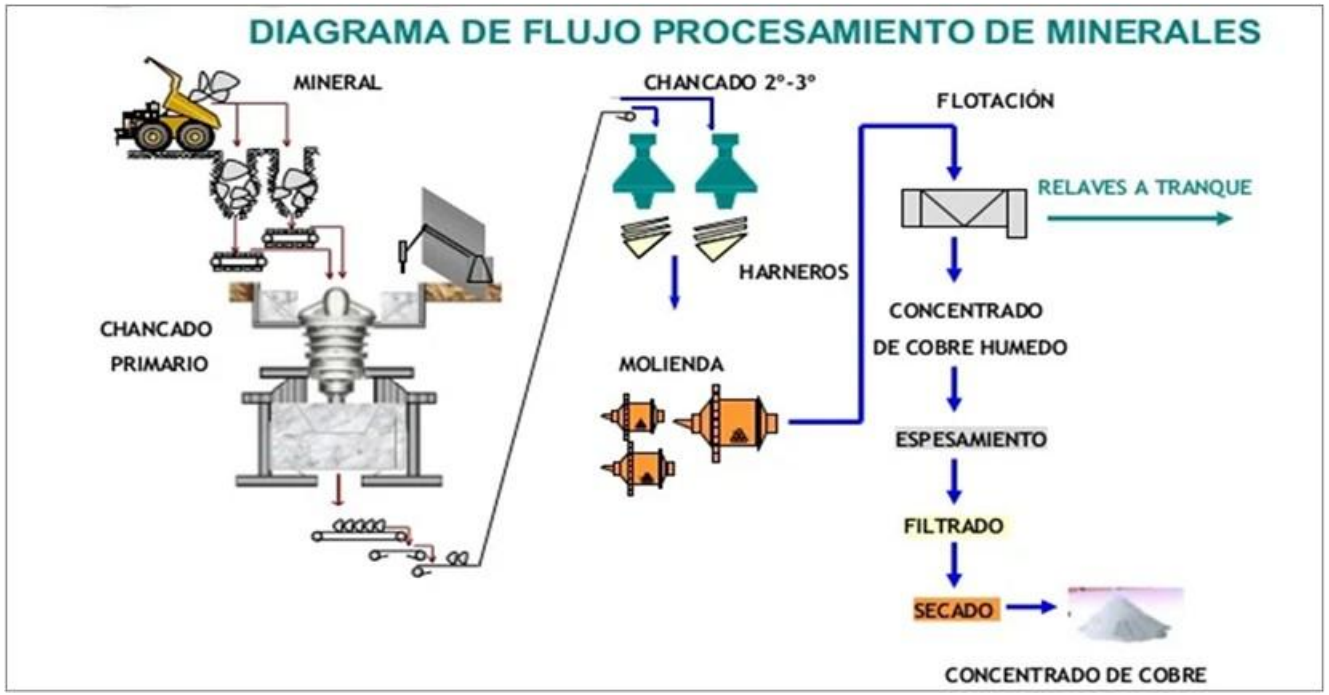


Figura 3: Diagrama Flujo Procesamiento de Minerales COCHILCO

"Subproducto industrial con potencial de impacto ambiental y geotécnico, cuya gestión condiciona la continuidad operacional, la estabilidad física del depósito y la aceptación social del proyecto."

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Definición técnica y operativa de relaves

Una Pulpa de Mineral y agua y como tal, un fluido:

El **relave** es una mezcla heterogénea compuesta por agua, partículas sólidas de mineral residual y, en muchos casos, reactivos químicos residuales. Su comportamiento como **fluido no newtoniano** y sus propiedades físico-químicas lo convierten en un material de especial interés para el diseño, operación y gestión de depósitos.

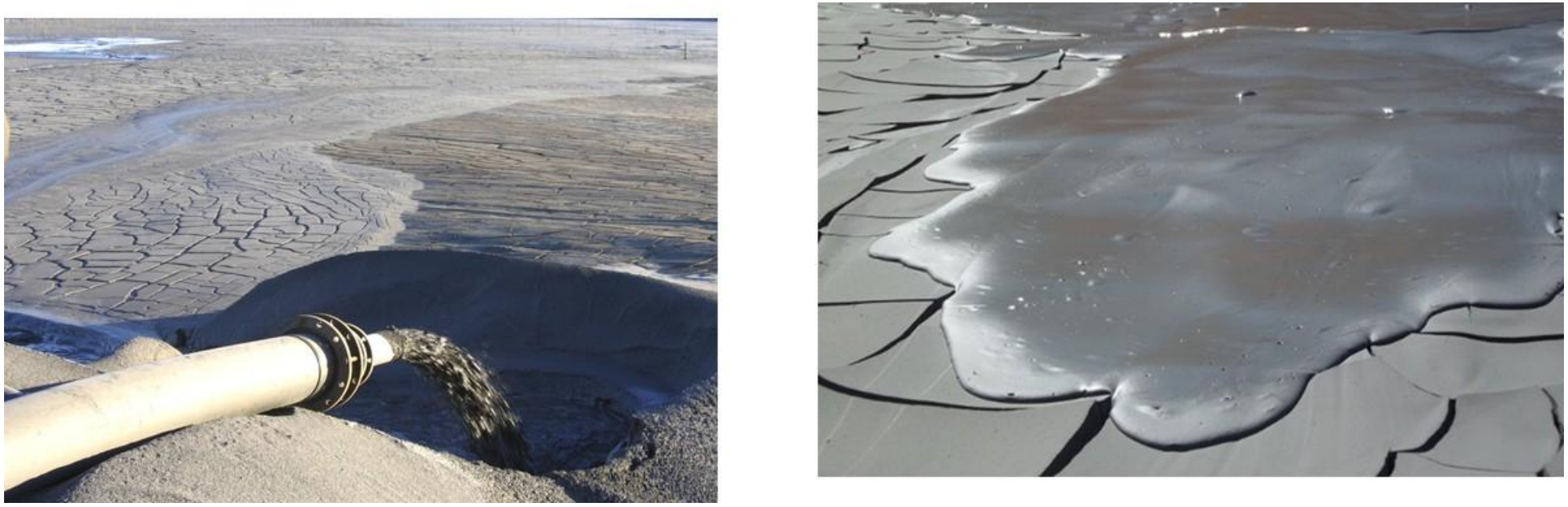


Figura 4: Imágenes de descarga de relaves convencionales

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Definición técnica y operativa de relaves









Figura 5: Imágenes diferentes tipos de relaves

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Origen y clasificación general de relaves según proceso minero

Los relaves varían en composición y comportamiento según el tipo de mineral procesado y el método de concentración empleado. Se pueden clasificar operativamente como:

- ❖ Relaves de flotación: Lodos con partículas finas, uso intensivo de reactivos.
- ❖ Relaves de lixiviación: Contienen sales, cianuros, compuestos solubles.
- ❖ Relaves de concentración gravimétrica o magnética: Menor carga química, pero alto volumen.

Estos tipos definen sus propiedades de manejo, riesgo geotécnico y comportamiento hidráulico.

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Clasificación Geotécnica de Relaves

Tabla 1: Resumen de tipos de relaves y clasificación geotécnica (ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

Tailings Type	Symbol	Description (compare)	Example of mineral/ore
Coarse tailings	CT	Silty SAND, non-plastic	Salt, mineral sands, coarse coal rejects, iron ore sands
Hard Rock tailings	HRT	Sandy SILT, non to low plasticity	Copper, massive sulphide, nickel, gold
Altered Rock tailings	ART	Sandy SILT, trace of clay, low plasticity, bentonitic clay content	Porphyry copper with hydrothermal alteration, oxidized rock, bauxite. leaching processes
Fine tailings	FT	SILT, with trace to some clay, low to moderate plasticity	Iron ore fines, bauxite (red mud), fine coal rejects, leaching processes, metamorphosed/weathered polymetallic ores
Ultra Fine tailings	UFT	Silty CLAY, high plasticity, very low density and hydraulic conductivity	Oil sands (fluid fine tailings), phosphate fines; some kimberlite and coal fines

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

¿Qué son los relaves? Importancia de su definición en la gestión sostenible

La definición precisa de relaves permite diseñar estrategias de manejo alineadas con objetivos de:

- ❖ Estabilidad física y química a largo plazo.
- ❖ Minimización del riesgo ambiental y social.
- ❖ Maximización de la recuperación de agua y recursos valiosos.
- ❖ Cumplimiento regulatorio y normativo (GISTM, MAC, ICMM).

"Un relave mal caracterizado puede transformarse de pasivo operativo a catástrofe ambiental."
(Baker et al., 2020).

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Características físicas de los relaves

- **Granulometría:** Tamaño variable desde arcillas a arenas gruesas. Influye en la permeabilidad, comportamiento de consolidación y estabilidad geotécnica. Distribución de tamaño de partícula: bimodal o polimodal; influye en sedimentación, filtración y consolidación.
- **Contenido de humedad / Porcentaje de sólidos**; varía típicamente entre 25% y 80%, dependiendo del tipo (convencional, espesado, en pasta, filtrado).
- **Densidad y consistencia**: Condiciona el transporte (bombeo, canaletas) y el diseño hidráulico. Densidades típicas en relaves, de 1.200 a 1.800 kg/m³ (según mineralogía y concentración).
- **Reología**: Viscosidad y comportamiento no-newtoniano, clave para espesado y disposición. La viscosidad, aumenta con el contenido de sólidos; los relaves en pasta pueden presentar comportamiento pseudoplástico.
- **Ángulo de reposo:** mayor en relaves espesados o filtrados, afecta la pendiente de playa.

Estabilidad Física

Se refiere a la seguridad estructural del deposito de relaves, requiere resistencia y disminución de fuerzas desestabilizadoras y para ello se toman medidas que evitan la falla o colapso. Consiste en conseguir que el depósito de relaves no se desmorone ni se desborde, es decir, que contenga los sólidos depositados, y no sufra deformaciones e el tiempo (Estabilidad Geotécnica).

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Características físicas de los relaves

Tabla 2: Gravedades específicas de distintos tipos de relaves (ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

Examples of Tailings Source	Tailings Type	Specific Gravity (t/m^3)
Salt	CT	1.5
Iron ore sands or coarse coal rejects	CT	2.5 – 2.8
Gold, copper	HRT - ART	2.7
Sulphidic ores	HRT - ART	3.2 – 3.8
Base metals	HRT - ART	3.5 - 4.2
Bauxite	FT	2.7 – 3.0
Coal fines (varies with percentage of coal)	FT	1.6 to 2.2
Mine water treatment residues	UFT	<0.3
Leach residues/ Bioxidation fine tailings	UFT	< 1.0

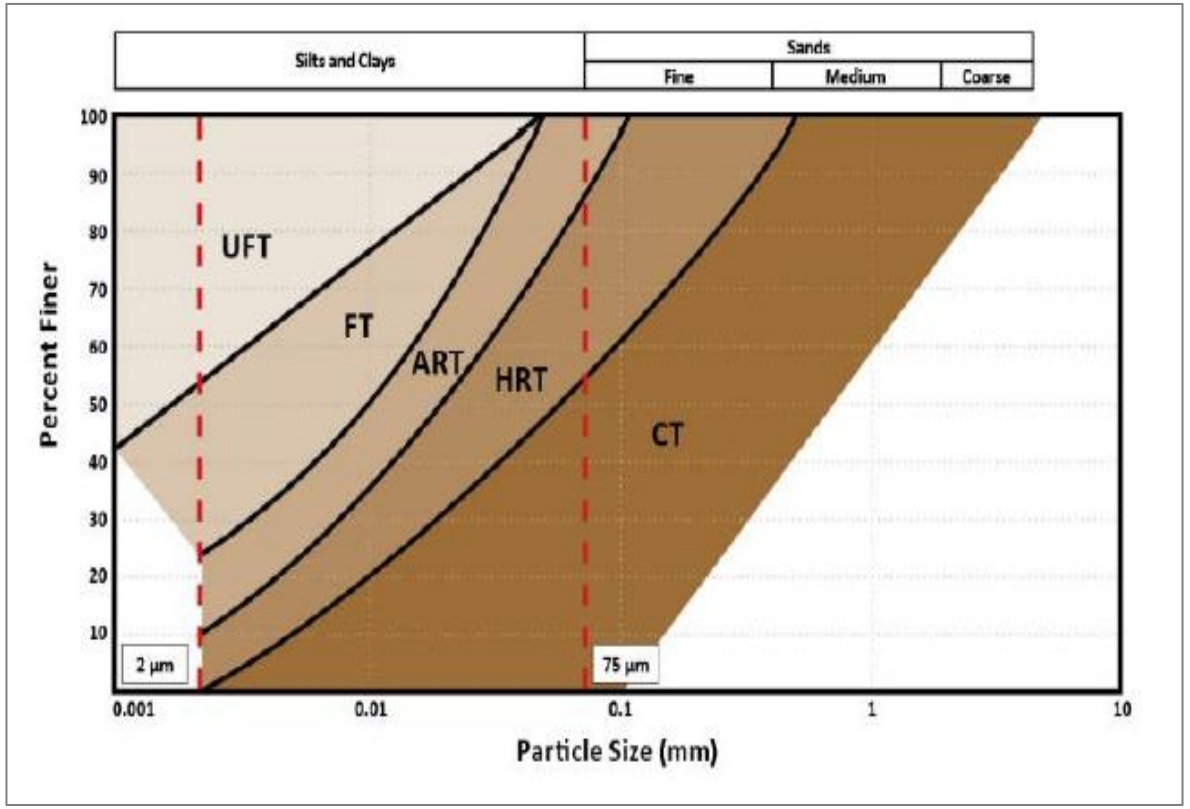


Figura 6: Rango de gradación para distintos tipos de relaves (ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y como se generan

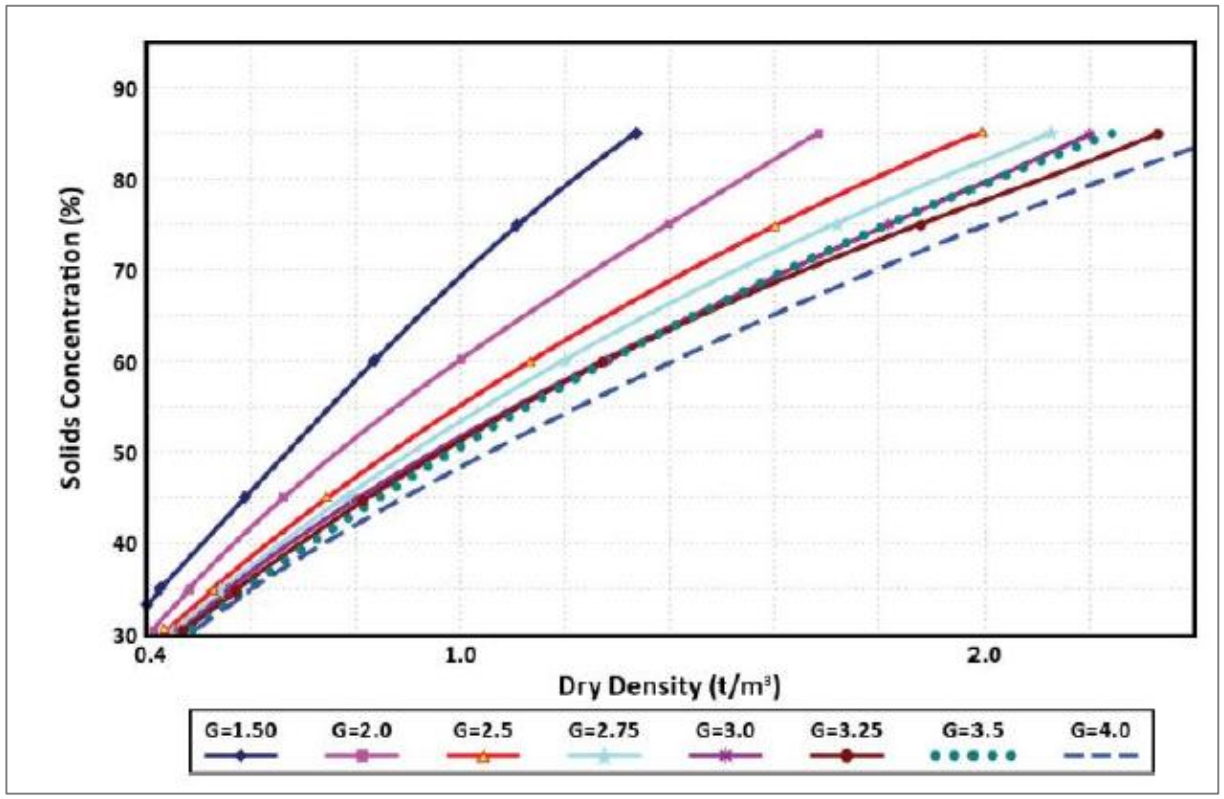


Figura 7: "Concentración de sólidos (%) versus densidad seca para diferentes gravedades específicas (G)".
(ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

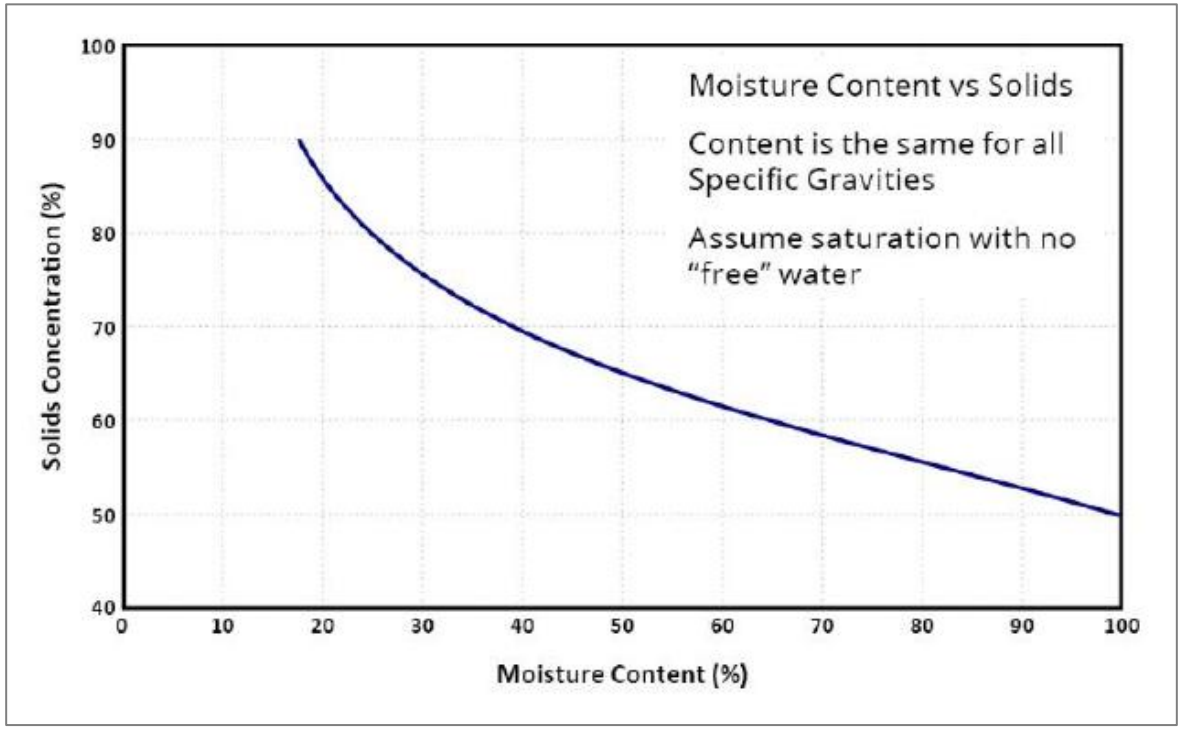


Figura 8: Concentración de sólidos (%) versus contenido de humedad (%) para relaves saturados.

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Características químicas de los relaves

- **Composición mineralógica**: Silicatos, óxidos, sulfuros (pirita, calcopirita, etc.).

- **Potencial ácido-generador (DAM)**: Presencia de sulfuros puede desencadenar drenaje ácido si no se gestiona adecuadamente, en presencia de agua, puede oxidarse y liberar metales pesados y acidez.
- **Metales disueltos**: Cu, As, Zn, Fe, entre otros. Pueden lixiviar y contaminar aguas superficiales/subterráneas.

- **Reactividad geoquímica**: Capacidad de interacción con el medio ambiente y generación de productos secundarios (jarosita, goethita, etc.).

- **pH:** generalmente entre 6 y 10, pero puede variar ampliamente según el proceso metalúrgico.

- **Presencia de reactivos residuales:** como xantatos, cal, floculantes, colectores o espumantes, lo que puede afectar el comportamiento ambiental e hidrodinámico.

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Características químicas de los relaves

Estabilidad Química

Se entenderá que un depósito de relaves se encuentra estable químicamente cuando en su interacción con los factores ambientales, no genera impactos significativos que impliquen un riesgo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente.

EJ: El contenido de metales pesados en relave, como la pirita, FeS2, al estar en contacto con el medio, se oxidan, liberando iones H+, generando drenaje ácido, lo que es perjudicial para el suelo (MA).

Fenómenos de acidificación generando impacto:

Pirita;	$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$
Galena;	$PbS + 2O2 \rightarrow PbSO4$

La exigencia de Estabilidad Química consiste en conseguir que los materiales depositados no aporten elementos o compuestos químicos al ecosistema circundante, por transporte aéreo (viento) ni por disolución hacia aguas del entorno (subterráneas o superficiales).

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Características químicas de los relaves

Tabla 3: Resumen de la influencia de la fuente de arcilla en la conductividad hidráulica, las propiedades de sedimentación y la sensibilidad a la humedad.
(ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

Clay Type	Plasticity	Activity Index	Hydraulic conductivity Influence	Settling Characteristics	Constructability Moisture Sensitivity
Rock flour	Non-plastic		Hydraulic conductivity directly related to Hazen values	Generally good settling properties	Moisture sensitive during construction
Kaolinite	Low plasticity	0.40	Upper end of clay hydraulic conductivity	Generally good settling properties	Sensitive to moisture content during construction and exhibits moderate consolidation rates
Illite	Medium plasticity	0.90	Intermediate hydraulic conductivity between kaolinite and montmorillonite	Intermediate between kaolinite and montmorillonite	Intermediate between kaolinite and montmorillonite
Montmorillonite	High plasticity	>1.5	Very low permeabilities	Poor settling properties with light weight flocs easily disturbed by wind and wave. Slow rate of consolidation	Sensitive to moisture content during construction and exhibits high settlements and slow consolidation rates

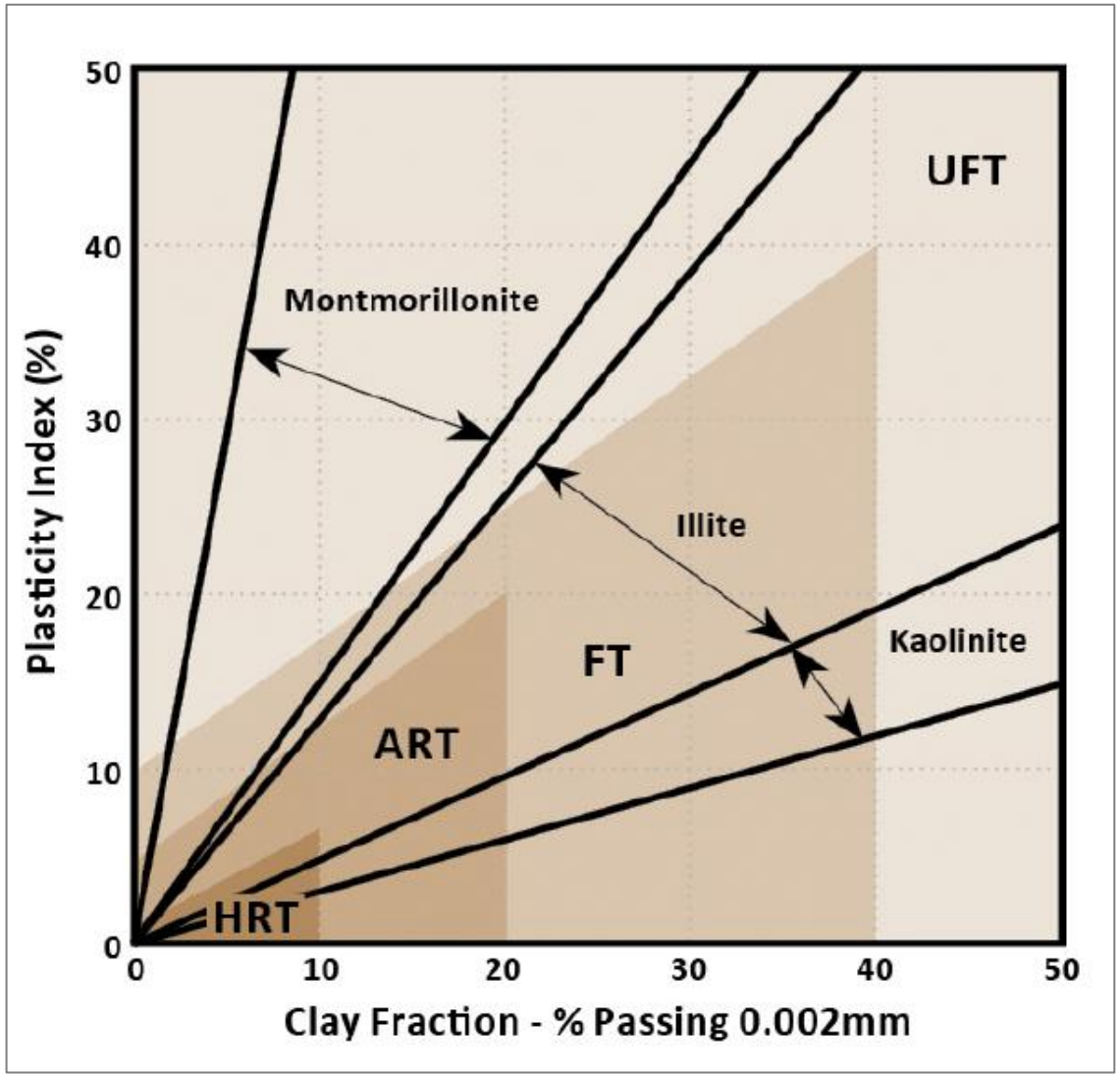


Figura 9: Índice de plasticidad v/s contenido de arcillas en relaves
(ICOLD Bulletin, Klohn Crippen Berger, 2017)

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Interrelación entre Propiedades Físicas y Químicas

Comportamiento como fluido:

- No newtoniano en alta concentración de sólidos.
- Puede presentar un flujo laminar o turbulento, según velocidad y diámetro de tubería, pero también un flujo bifásico sólido-líquido, en suspensión o estratificación.
- Propenso a la segregación hidráulica si no se controla adecuadamente.

Comprender estas propiedades es clave para:

- El diseño hidráulico de sistemas de transporte y descarga.
- La selección del tipo de disposición.
- La evaluación de estabilidad física e hidrológica del depósito.
- La recuperación de agua y mitigación de impactos ambientales.

Las características físicas condicionan la movilidad de los contaminantes y las propiedades químicas determinan el tipo de tratamiento o remediación necesario.

Ambas propiedades son críticas para la clasificación, disposición y gestión de riesgos

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

"De la roca al residuo: génesis del relave"



De la roca al residuo: génesis del relave

- **Extracción**
- **Trituración / Molienda**
- **Clasificación**
- **Concentración / flotación**
- **Espesamiento**
- **Relaves**

Todo relave es un residuo inevitable de los procesos metalúrgicos modernos. Su origen es técnico y secuencial.

Tabla 4: Generación de relaves en procesos de concentración

ETAPA	ROL en la GENERACIÓN DE RELAVES	CARACTERISTICA del material generado
Molienda	Liberación de minerales valiosos	Polvo fino, alta superficie específica
Flotación	Separación de mineral útil	Alta humedad, residuos con reactivos
Espesamiento	Recuperación de agua	Pulpa con 60-70% de sólidos

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Fallas por mal manejo…..XIANGFEN, provincia de Shanxi, CHINA (2008)

El depósito de relaves de Xiangfen, construido en 1977, colapsó el 8 de septiembre de 2008 tras su uso ilegal y mal gestionado por una empresa privada desde 2007. La falla liberó aproximadamente 190.000 m^3 de relaves, que recorrieron 2,5 km y afectaron 35 hectáreas.

El evento provocó 277 muertes y pérdidas directas por USD 13 millones, además de un grave impacto social.

Las causas principales fueron:

- Construcción de un muro con pendiente excesiva.
- Uso simultáneo como embalse de agua.
- Nivel freático elevado.
- Deficiencias de drenaje.

Este caso evidencia cómo la negligencia operativa y la falta de control institucional pueden derivar en desastres mayores.

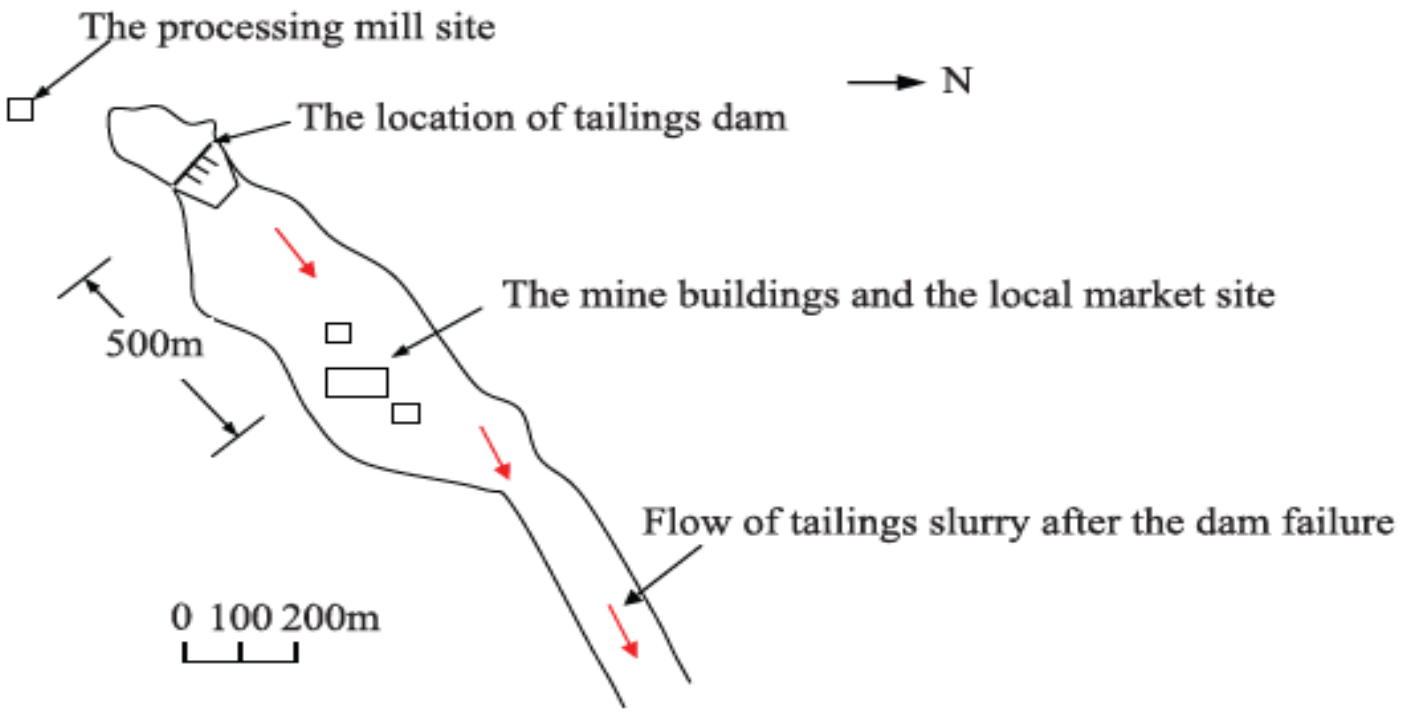


Figura 10: Falla de la presa de relaves de Xiangfen: imagen del estanque de relaves después de la falla y plano esquemático del lodo de relaves fluyendo aguas abajo



Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Fallas por mal manejo…..BRUMADINHO, Estado de Minas Gerais, BRASIL (2019)

En Enero de 2019 en Brumadinho (Brasil) una presa de relaves mineros de gran tamaño colapsó en su totalidad de forma brusca, causando la muerte a 270 personas y una gran conmoción en la minería mundial.

- Presa de relave había sido cerrada el año 2017.
- Fito estabilizada y recubierta con tierra de cultivo.
- Inestabilidad de Taludes; NO se consideró la saturación por aguas lluvias y escorrentías.
- 13 millones de m3 de relaves descargados, post colapso.
- 332 personas desaparecidas (270 muertos).



Figura 11: Imagén del antes y después del Colapso Represa de Brumadinho en el Estado de Minas Gerais, Brasil 2019

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición de Relaves: Qué son y cómo se generan

Fallas por mal manejo…..BRUMADINHO, Estado de Minas Gerais, BRASIL (2019)









Figura 12: Imágenes del Colapso Represa de Brumadinho

Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por método constructivo

Existen tres grandes tipos de construcción de TSF, que se muestran a continuación. La elección del diseño se basa en factores como:

- ❖ Ubicación de la TSF
- ❖ Condiciones del sitio (geología, sismicidad, condiciones climáticas)
- ❖ Materiales de construcción
- ❖ Características de los relaves.

Los métodos constructivos definen cómo se eleva el muro de contención en el tiempo conforme se depositan los relaves. Se distinguen tres técnicas principales:

Upstream (Crecimiento hacia aguas arriba): Las nuevas etapas del muro se construyen sobre el depósito previamente asentado de relaves. Es el método más económico, pero con mayor riesgo de inestabilidad ante sismos o saturación, como evidenció la tragedia de **Brumadinho (Brasil, 2019)**.

Centerline (Crecimiento en línea central): Las elevaciones se realizan manteniendo la base del muro alineada verticalmente. Este método ofrece un balance entre seguridad y costo. Fue utilizado, por ejemploen la represa de **Jinchuan (China, 2008)**.

Downstream (Crecimiento hacia aguas abajo): Cada nueva etapa del muro se construye fuera del cuerpo de relaves, sobre fundaciones estables. Es el más seguro estructuralmente, ideal en zonas sísmicas, pero requiere mayor superficie y costo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por método constructivo

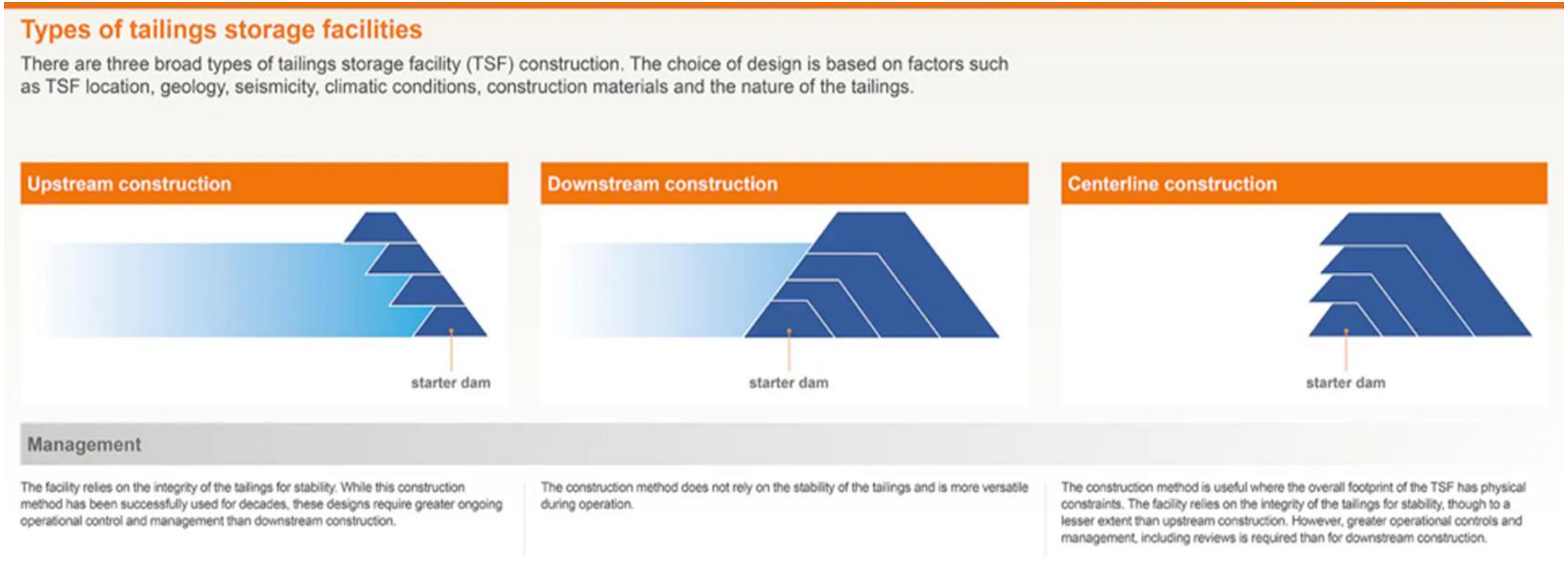


Figura 13: Métodos de construcción de TSF

En Chile, el método de construcción aguas arriba está prohibido desde 1970.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por estado físico (Módulo 2)

Relave Convencional:
Relaves con alto contenido de agua, disposición por canaletas o tuberías (slurry). Alta fluidez.

Espesado:
Se reduce el contenido de agua. Mejora en estabilidad de depósito.

En pasta:
Relaves que fluyen como masa viscosa. Mayor ángulo de reposo.

Filtrado (seco):
Sólidos >80%. Disposición en capas y compactación mecánica

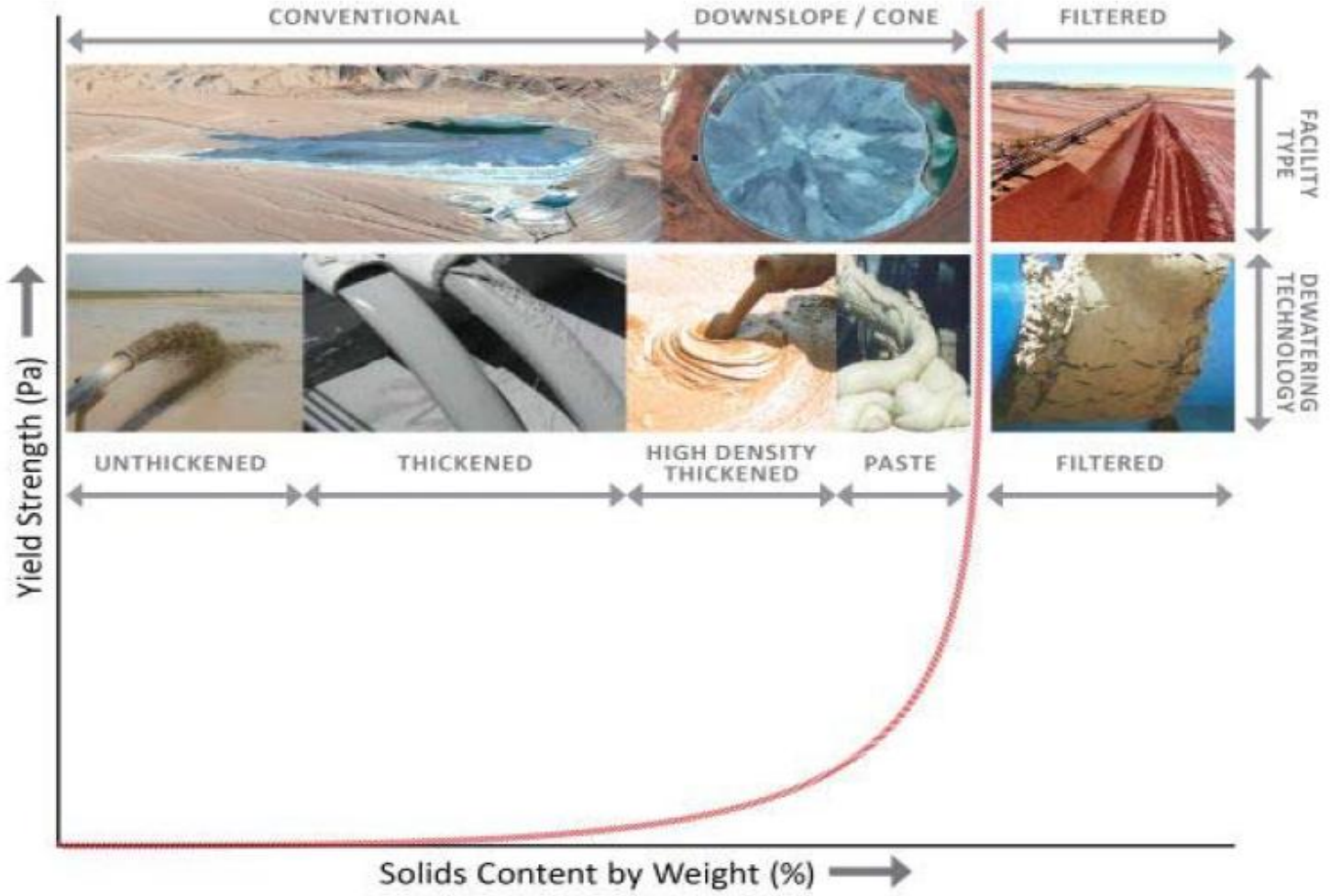
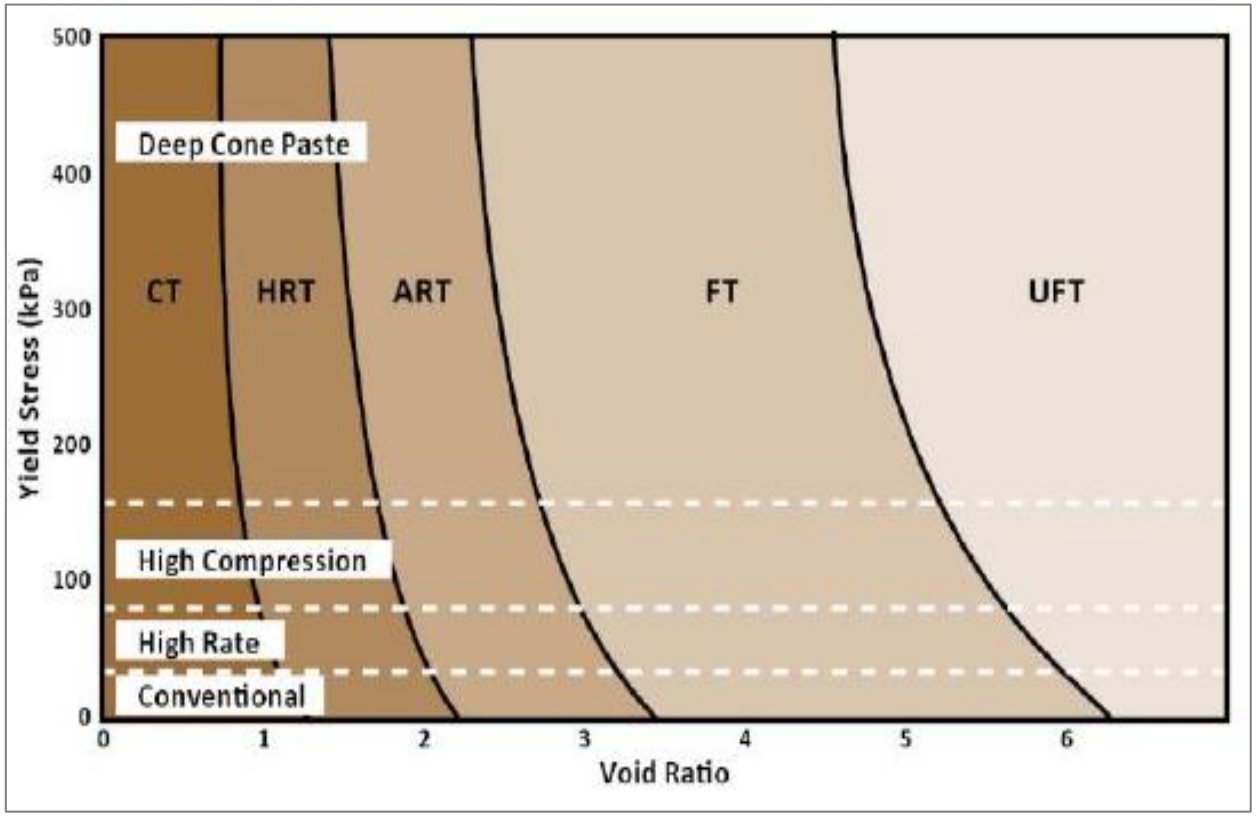


Figura 14: Continuidad en Depósitos de Relaves; Tensión de Fluencia v/s % de sólidos Klohn Crippen Berger (2017) & Google Earth (2019)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por estado físico



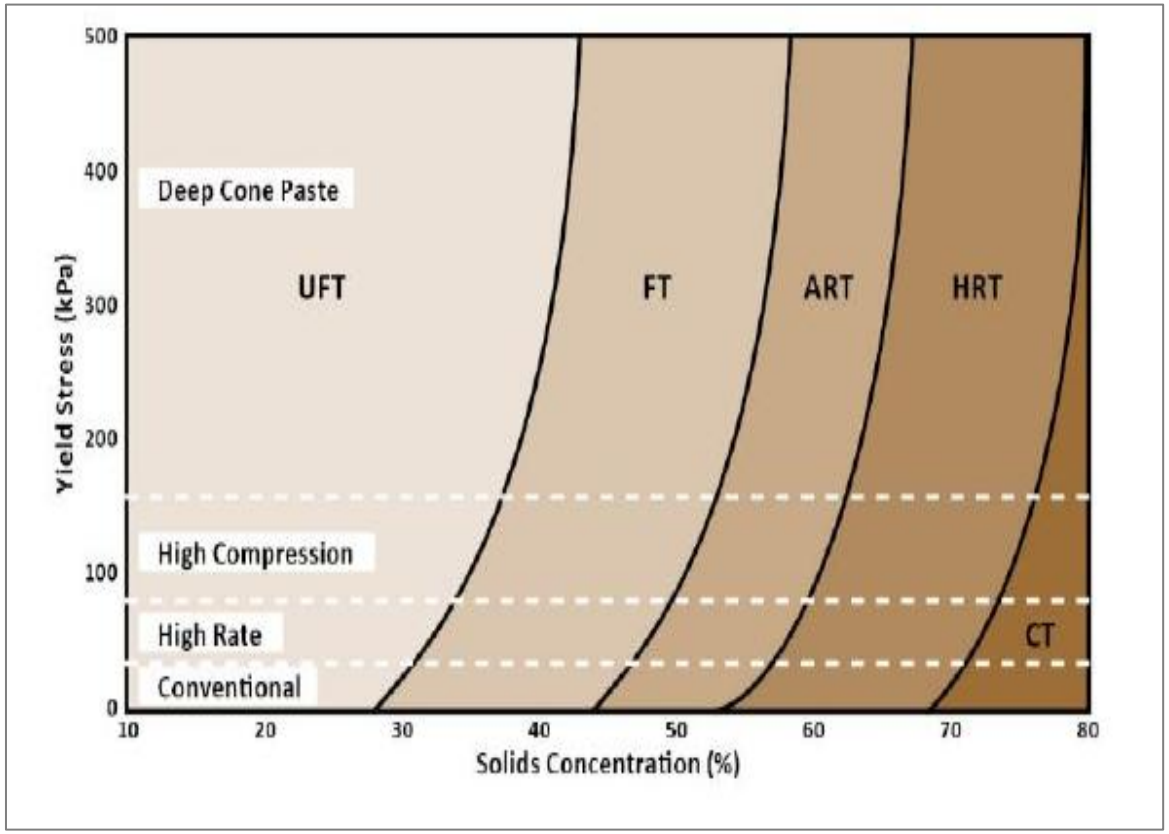


Figura 15: "Tensión de fluencia versus concentración de sólidos y relación de vacíos para tipos de relaves. Klohn Crippen Berger (2017) & Google Earth (2019)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por forma de disposición

Disposición en superficie terrestre, al interior de un muro de contención o tranque.

Es el método más común históricamente.

Características clave:

- Depósito generalmente en valles, quebradas o depresiones topográficas.
- Relaves descargados por canaletas, tuberías o spigots.
- Manejo de agua superficial y recirculación.

Ventajas:

- Bajo costo de implementación inicial.
- Aprovechamiento de la topografía.

Desafíos:

- Alta susceptibilidad a inestabilidad si no se controla el contenido de agua.
- Mayor riesgo de impacto ambiental ante fallas.



Figure 16. Contención de relaves en valle transversal en Highland Valley Copper, Columbia Británica, Canadá.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por forma de disposición

Disposición Subacuática

Los relaves se depositan completamente sumergidos bajo una columna de agua, comúnmente en cuerpos naturales (lagos, fiordos) o artificiales (presas).

Objetivo principal: Minimizar la oxidación de sulfuros y la generación de drenaje ácido de mina (DAM).

Ejemplo técnico: Utilización en ambientes de alta pluviometría o donde se prioriza la mitigación del potencial ácido.

Ventajas:

- ❖ Reducción de la dispersión de polvo y metales pesados.
- ❖ Control pasivo de procesos geoquímicos.

Desventajas:

- ❖ Riesgos ambientales si no se realiza evaluación de impacto exhaustiva.
- ❖ Alta complejidad de monitoreo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves
Clasificación por forma de disposición

Disposición en Dry Stacking

Disposición de relaves en estado casi seco, con contenido de humedad <20% (relaves filtrados).
Proceso: Filtrado mecánico (vacío o presión).Apilamiento con equipos móviles o correas.

Ventajas:
- ❖ Mayor estabilidad física del depósito.
- ❖ Alta recuperación de agua (>80%).Mejor comportamiento sísmico.

Desventajas:
- ❖ Costos de CAPEX y OPEX elevados.
- ❖ Limitaciones para altos tonelajes.

Consideraciones: Mayormente usados en proyectos nuevos o ubicaciones con restricciones hídricas y de espacio.



Figura 17. Transportador de apilamiento de relaves móvil (MSC) La Coipa

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Clasificación por forma de disposición

Co-disposición de métodos

Mezcla y disposición conjunta de relaves y estériles mineros.

Modalidades:

- Codisposición simultánea: relaves y estériles en forma conjunta.
- Codisposición secuencial: capas alternadas.

Ventajas:

- Aprovechamiento integral del terreno.
- Mejora en estabilidad geotécnica si se diseña adecuadamente.
- Reducción del número de instalaciones.

Limitaciones:

- Diseño y operación más complejos.
- Dificultades en separación/reaprovechamiento futuro.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Otros criterios de clasificación de los depósitos de relaves

Según estado operativo:

- Activos: en operación y recepción de relaves.
- Inactivos: detenidos temporalmente.
- Cerrados: oficialmente clausurados con o sin plan de cierre certificado.

Según etapa del ciclo de vida:

- Construcción
- Operación
- Cierre
- post-cierre (con monitoreo y mantenimiento)

Según entorno geográfico y climático:

- Regiones áridas vs. Húmedas
- Relaves de alta montaña, valle, desierto o costeros
- Influencia de la topografía, sismicidad, y condiciones meteorológicas extremas

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves
Otros criterios de clasificación de los depósitos de relaves

Chile cuenta con 757 relaves mineros, concentrados entre la tercera y cuarta región

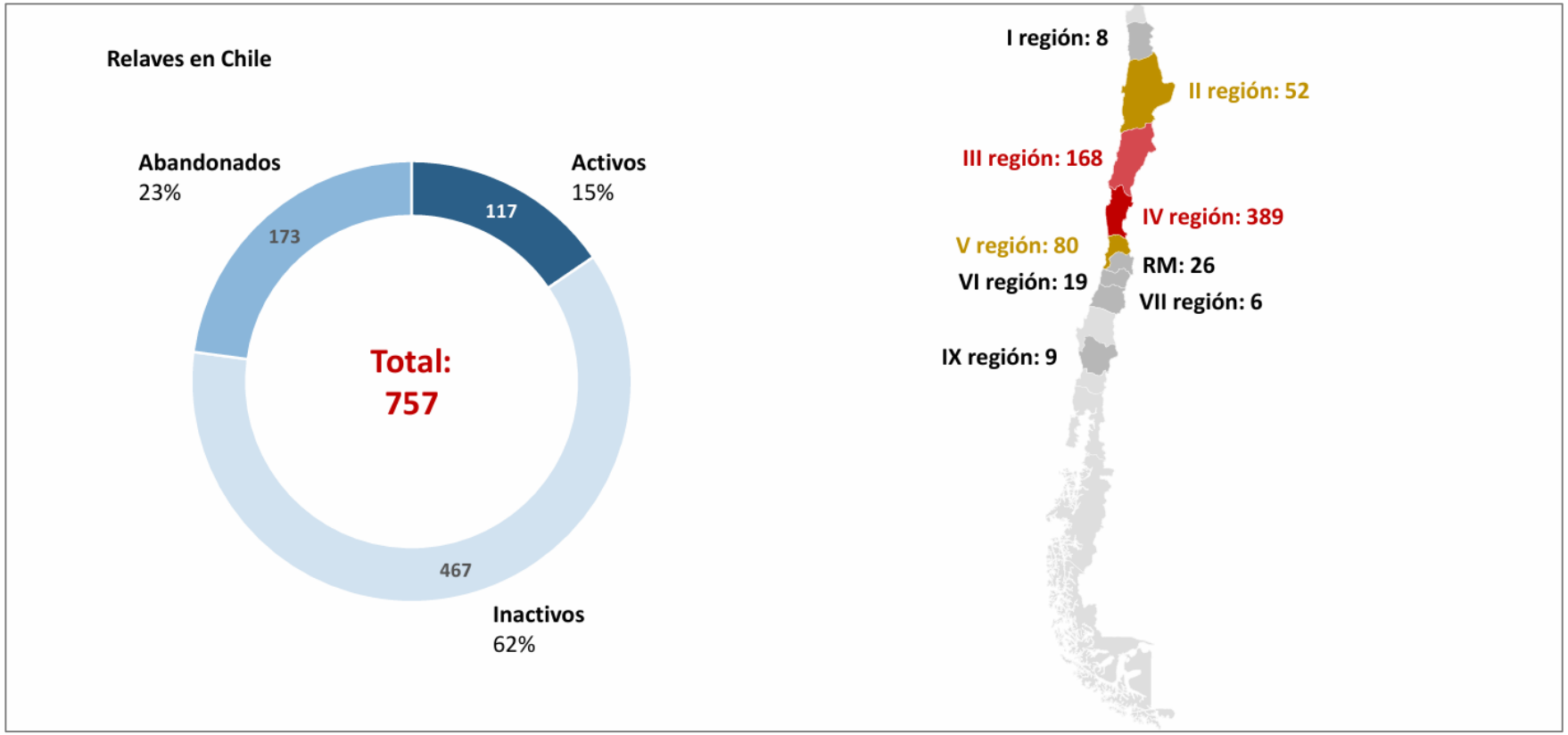


Figura 18. Relaves en Chile (SERNAGEOMIN 2022)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Otros criterios de clasificación de los depósitos de relaves

Estimaciones indican que relaves son los residuos mineros de mayor tonelaje y contenido de cobre, con más de 30 Mton de cobre, cerca de 6 veces la producción nacional anual

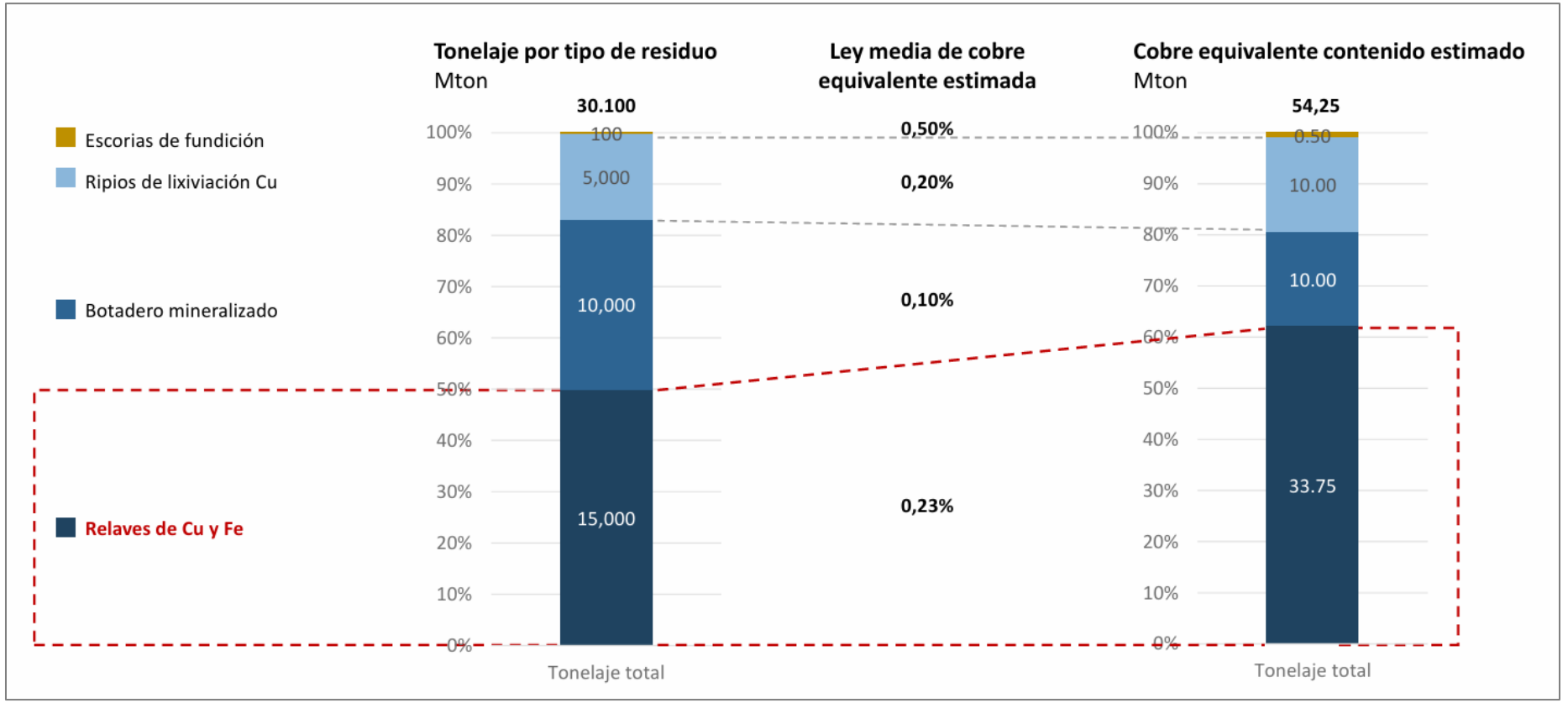


Figura 19. Levantamiento de fuentes (Ministerio Minería - Chile 2022)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 2: Clasificación de los Depósitos de Relaves

Comparación integrada de tipos de depósitos

Tabla 5: Comparación tipos de depósitos de relave

CRITERIO	TIPOS DE DEPÓSITOS
Método constructivo	Upstream, downstream, centerline
Estado físico	Convencional, espesado, en pasta, filtrado
Forma de disposición	Subaérea, subacuática, dry stacking, codisposición
Uso operativo	Activo, cerrado
Etapa del ciclo de vida	Construcción, operación, cierre
Entorno geográfico	Árido, húmedo, alta montaña, etc.

RelaveNet
A Community of Excellence


RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Parámetros técnicos clave. Estabilidad

- **La estabilidad física** de un TSF depende de:
  - geometría del depósito
  - tipo de construcción (up, down, center)
  - saturación del material
  - características del subsuelo.

- Las fallas más comunes incluyen deslizamientos superficiales o profundos, fallas de borde o de talud, inestabilidad por erosión interna y licuefacción sísmica.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Parámetros técnicos clave. Estabilidad

- Los relaves convencionales son más propensos a falla por sobrepresión de poros y pérdida de resistencia no drenada.
- Depósitos en pasta y filtrados tienen menor riesgo por su menor grado de saturación y resistencia al flujo viscoso.
- El diseño debe considerar el factor de seguridad mínimo (FoS ≥ 1.5 estático; ≥ 1.1 sísmico), control de infiltración y refuerzo estructural si corresponde.
- Los relaves convencionales son más propensos a falla por sobrepresión de poros y pérdida de resistencia no drenada.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental
Parámetros técnicos clave. Estabilidad

- Depósitos en pasta y filtrados tienen menor riesgo por su menor grado de saturación y resistencia al flujo viscoso.





Figura 20. a) Relaves convencionales b) Relaves filtrados

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Enfoque comparativo general de las condiciones de drenaje según tipo de TSF

El sistema de drenaje *"controla el equilibrio hidráulico del TSF y reduce el riesgo de saturación y generación de presión intersticial".*

- El diseño de drenaje tiene implicancias directas sobre la estabilidad, recuperación de agua y riesgo de erosión.

- Cada tipo de TSF presenta requerimientos distintos:
  - Convencional: drenaje subterráneo y perimetral.
  - Espesado: control del pie de playa y gradientes.
  - Filtrado: drenaje superficial y sellos estructurales.

(El detalle técnico del diseño hidráulico se abordará en el Módulo 2).

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental
Parámetros técnicos clave. Drenaje: Configuración interna

De la figura presentada ¿ que construcción del muro de partida conlleva un mayor riesgo?

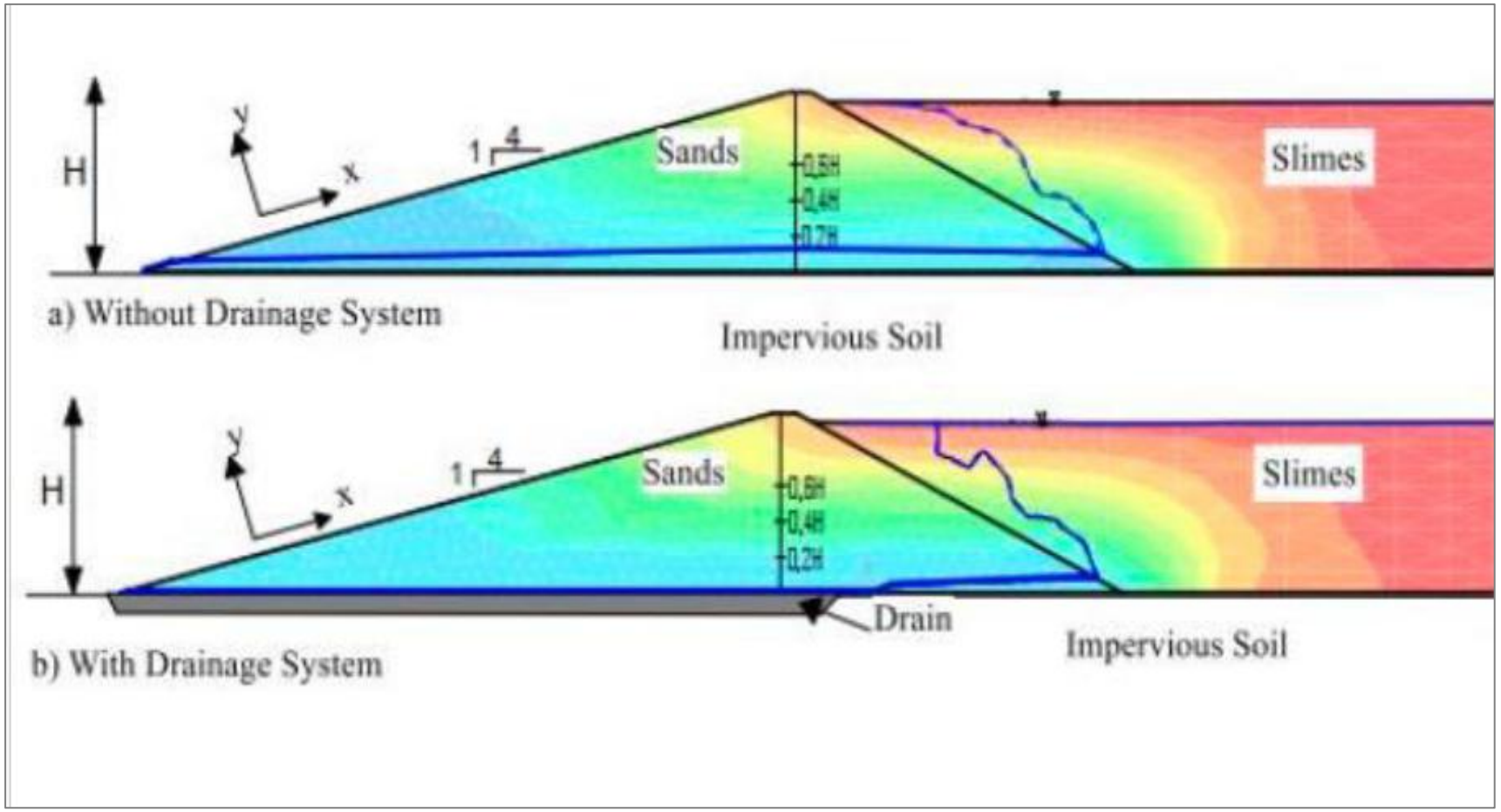


Figura 21. Representación esquemática de muro de relaves con y sin drenaje

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental
Pendiente de playa y su efecto en la eficiencia del depósito

- **El control de la playa** (beach) es clave para mantener la estabilidad aguas arriba. Se debe mantener una pendiente controlada (1–4%) y evitar escurrimientos hacia los muros.

- La pendiente influye en el escurrimiento superficial y la recuperación de agua.

- Depósitos convencionales tienden a playas más planas; relaves espesados y filtrados presentan mayor control sobre esta geometría.

- El manejo eficiente de aguas claras evita rebalses, erosión interna y disolución de contaminantes.

- La recirculación de agua es crítica para procesos y minimización del consumo hídrico.

(El detalle técnico del diseño hidráulico se abordará en el Módulo 3).

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Parámetros técnicos clave. Operación_control de playas y balance hídrico

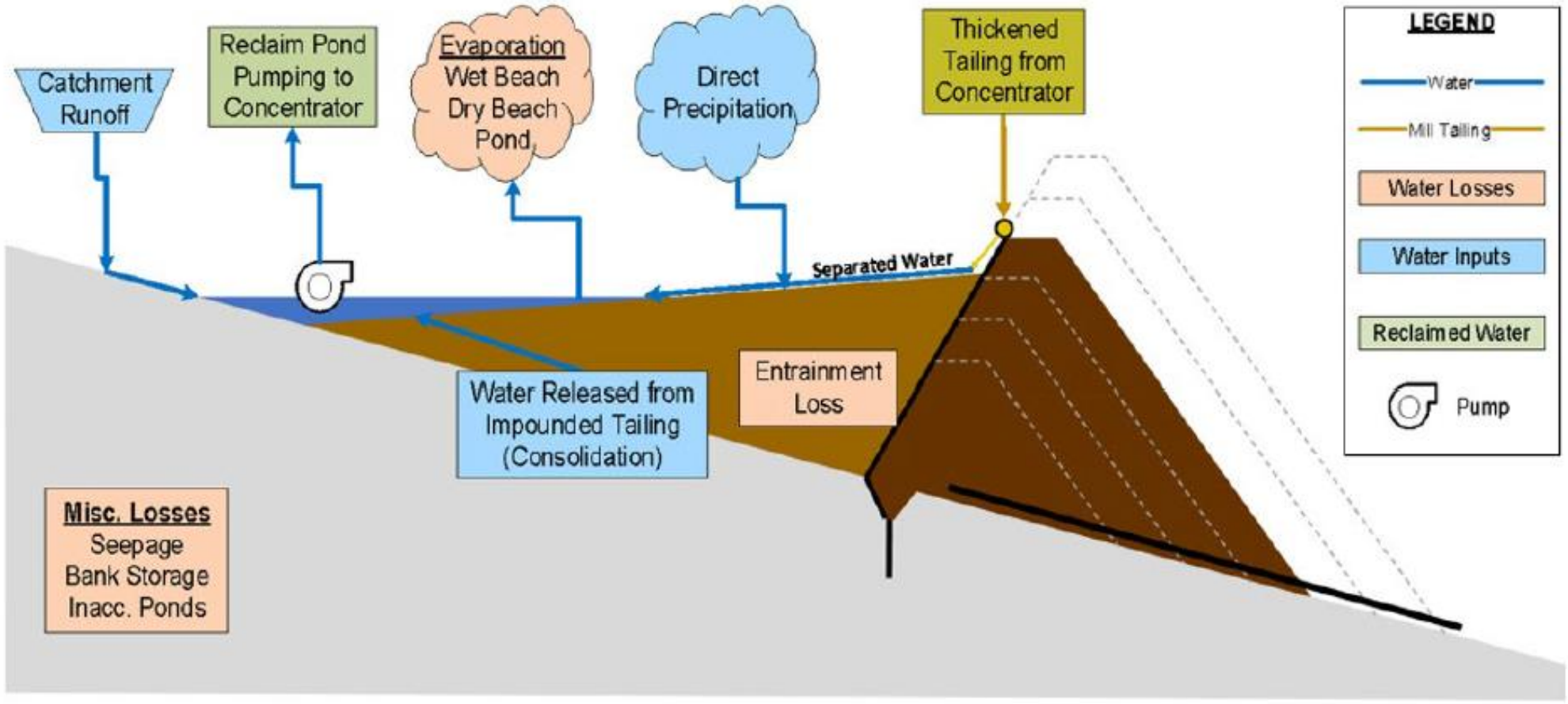


Figura 22 : Diagrama General Balance de Aguas
(Nicholas Brinks, et al 2022)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Parámetros técnicos clave. Aspectos de mantenimiento

- **Mantenimiento preventivo** incluye inspecciones mensuales, limpiezas trimestrales y rehabilitación anual de obras hidráulicas.

- En TSF convencionales: limpieza de canales (> 1.5 m^3/s), refuerzo de taludes con FoS ≥ 1.5. En filtrados: mantención de filtros de banda con caudal nominal de 100–150 t/h, control de humedad residual < 20%.

- Instrumentacion del muro: Piezómetros deben leerse semanalmente; desviaciones >10% requieren respuesta inmediata. El monitoreo geotécnico debe incluir estaciones topográficas (error < 2 mm) y sensores automatizados.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Comparación económica – CAPEX vs OPEX

INVERSIÓN INICIAL / COSTO OPERATIVO

- Los depósitos convencionales presentan bajo CAPEX inicial, pero altos costos asociados a mantenimiento, monitoreo, gestión de agua y riesgos a largo plazo.

- Los sistemas de relaves espesados y en pasta tienen costos intermedios, con inversión en espesadores y control reológico, pero menor costo por estabilidad y recirculación.

- La disposición filtrada (dry stacking) implica alto CAPEX (filtración, apilamiento, impermeabilización), pero el OPEX es menor gracias a:
  - Reducción de consumo hídrico
  - Eliminación de muros de contención hidráulica
  - Menor necesidad de monitoreo activo

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Comparación económica general

- Los análisis de costo deben incluir todo el ciclo de vida: desde diseño hasta cierre y post-cierre (externalidades evitadas por fallas).

- Aunque el CAPEX del filtrado puede triplicar al convencional, su menor OPEX, footprint y riesgo de fallo justifican la inversión en zonas críticas.

- Estudios de Cleaner Production (2015) muestran un ahorro de hasta 25% en costos integrados de ciclo de vida.

Tabla 6: Estudio de CP año 2015

TECNOLOGÍA	CAPEX [USD/t]	OPEX [USD/t/año]	VIDA ÚTIL [años]
Convencional	1.5 – 3.0	0.9 – 1.8	>25
Pasta	3.0 – 4.5	0.5 – 0.9	>25
Filtrado	7.0 – 10.0	0.2 – 0.5	>25

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Comparación ambiental

- Eficiencia hídrica, riesgo de contaminación, huella ambiental

- Relaves convencionales generan mayor riesgo ambiental:
  - Alta saturación → mayor potencial de generación de DAM
  - Requieren estanques de agua clara → riesgo de rebalse o ruptura

- Relaves espesados/en pasta mejoran la eficiencia hídrica (>65%) y disminuyen la infiltración.

- Filtrados (dry stacking):
  - Recuperación de agua >80%
  - Mínimo contacto relave-agua → baja lixiviación de metales
  - Reducción del área de afectación (huella ambiental)

- En zonas áridas, las tecnologías secas se vuelven casi obligatorias por balance hídrico negativo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Comparación ambiental

- La "huella ambiental" de TSF filtrados puede ser hasta 4 veces menor que el de un depósito convencional.

- Reducción significativa del riesgo de rebalse por ausencia de aguas claras.

Tabla 7: Parámetros según tipo de relaves

PARÁMETRO	CONVENCIONAL	PASTA	FILTRADO
Saturación típica	85–95%	60–75%	<20%
Recuperación de agua	30–40%	60–70%	>80%
Footprint (ha/Mt)	4 – 6	2 – 3	<1.5
Generación DAM (riesgo)	Alto	Medio	Bajo

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental
Evolución hacia disposición seca (dry stacking)

- La evolución de las tecnologías de disposición de relaves refleja la creciente presión por operar de manera sostenible, reducir riesgos catastróficos y mejorar el uso del agua.

- En Chile y otros países, se ha registrado un aumento sostenido en el uso de tecnologías de espesamiento avanzado y filtración, principalmente en proyectos nuevos o en zonas con limitaciones hídricas.

- En Chile (2022): 18 proyectos mineros incorporan filtración, 11 en estudio avanzado (Plan Nacional de Relaves). La adopción de filtrado creció de 3% (2000) a 26% (2020) en proyectos nuevos.

- Esta transición se apoya en políticas públicas, exigencias de inversionistas y lecciones aprendidas tras fallas como las de Samarco y Brumadinho (catalizador de implementación del GISTM en 2020).

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 3: Comparación Técnica, Económica y Ambiental

Comparativa multicriterio

Tabla 8: Comparación de criterios por tipo de Relaves

CRITERIO	CONVENCIONAL	PASTE	FILTRADO
Estabilidad estructural	★★	★★★	★★★★★
Eficiencia hídrica	★	★★★	★★★★★
Costo ciclo de vida	★★★	★★★★	★★★★
Complejidad operativa	★★	★★★	★★★★
Adaptabilidad climática	★	★★★	★★★★


RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Fallas de TSF: una amenaza técnica, ambiental y social

- Las fallas de depósitos de relaves (TSF) representan los eventos más severos que puede enfrentar la minería. Aunque su frecuencia es baja, sus consecuencias pueden ser devastadoras; estas fallas no solo son estructurales, sino que desencadenan crisis ambientales, sociales y reputacionales".

  - Pérdida de vidas humanas
  - Destrucción ambiental a gran escala
  - Interrupciones operacionales y sanciones regulatorias
  - Pérdida de la licencia social para operar

- Según ICOLD (2017) y GISTM (2020), más del 40% de las fallas se deben a deficiencias en drenaje o diseño estructural.

- Comprender sus causas es clave para anticipar riesgos y diseñar instalaciones más seguras.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Principales mecanismos de falla: visión general

Los siguientes mecanismos han sido identificados como los más relevantes en eventos históricos de falla en TSF, y se desarrollarán con ejemplos y análisis en las próximas diapositivas:

- Licuefacción sísmica
- Licuefacción estática
- Inestabilidad de taludes
- Inestabilidad del suelo de fundación
- Deformaciones sísmicas
- Desbordamiento (Overtopping) / Rebalse
- Erosión interna.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Mecanismos de falla de un TSF

LICUEFACCIÓN SISMICA

Este fenómeno se genera cuando un sismo produce un aumento en la presión intersticial del suelo rápidamente, sin posibilidad de disipación.

Esto conlleva a una disminución de los esfuerzos efectivos, anulándose en el peor de los casos, generando una reducción de la resistencia al corte y junto con ello grandes deformaciones.

La ocurrencia de este mecanismo depende del nivel de compacidad, el grado de saturación y el contenido de finos del material que conforma el muro.

NOTA: La licuefacción o licuación es el proceso de cambio físico en el que una sustancia en estado sólido o gaseoso pasa directamente a estado líquido, gracias a un cambio radical en sus condiciones físicas. Es la consecuencia de movimientos sísmicos (temblores intensos, incluso tsunamis), cuya energía es tal, que pueden variar la consistencia de ciertos suelos y hacerla semejante a la de un líquido pesado o la de arena movediza. Esto suele desencadenar aludes o derrumbes.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Mecanismos de falla de un TSF

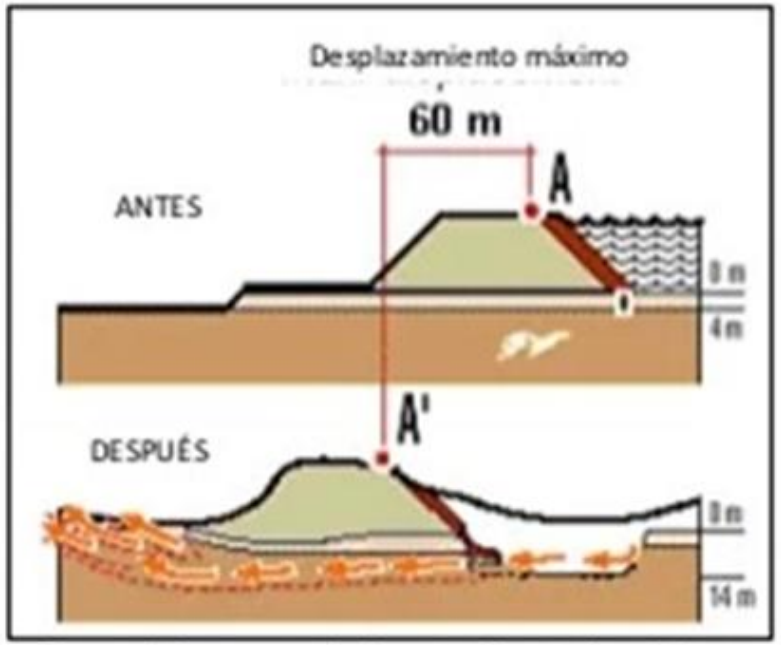
LICUEFACCIÓN ESTÁTICA

Mecanismo de falla producido por la reducción de la resistencia al corte de un material granular suelto que se comporta en forma no drenada.

La licuefacción estática puede ser causada por un aumento de deformación o esfuerzo de corte.



Falla de la presa de relaves en la mina Los Frailes, España, 1998



El agua del estanque de decantación entró en la base debajo de la presa, lo que produjo una licuefacción estática

Figura 23: Licuefacción estática resultante de una combinación de carga excesiva y agua excesiva (Mina Los Frailes, España 1998

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

2019-Brasil-Colapso instantáneo por licuefacción – Caso Brumadinho

La falla ocurrió en segundos por licuefacción de material saturado sin drenaje ni control de presión intersticial.

270 personas murieron, y el desastre generó una gran presión en la industria minera brasileña para revisar sus métodos de disposición de relaves y mejorar las medidas de seguridad.



Figura 24: Desastre de Brumadhiño 2019

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Mecanismos de falla de un TSF

INESTABILIDAD DE TALUDES

La inestabilidad de taludes se puede producir por lluvias o filtraciones que aumentan las presiones de poros en el suelo, cargas superiores a las consideradas en el diseño, excavaciones al pie del muro que reduzcan el prisma resistente, colapso del sistema de drenaje, sismos que generen licuación de materiales, entre otros, afectando la estabilidad estructural y operacional del depósito.

Parámetros críticos asociados:

- Presión de poros (↑ por infiltraciones o falta de drenaje)
- Geometría del talud (ángulo, altura, pie de muro)
- Sismos (aceleración, duración)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Mecanismos de falla de un TSF

INESTABILIDAD DEL SUELO DE FUNDACIÓN

Este mecanismo de falla se genera por una inadecuada capacidad de soporte o excesiva deformación del suelo de fundación.

Causas:

- ❖ suelo blando
- ❖ Saturación
- ❖ carga asimétrica

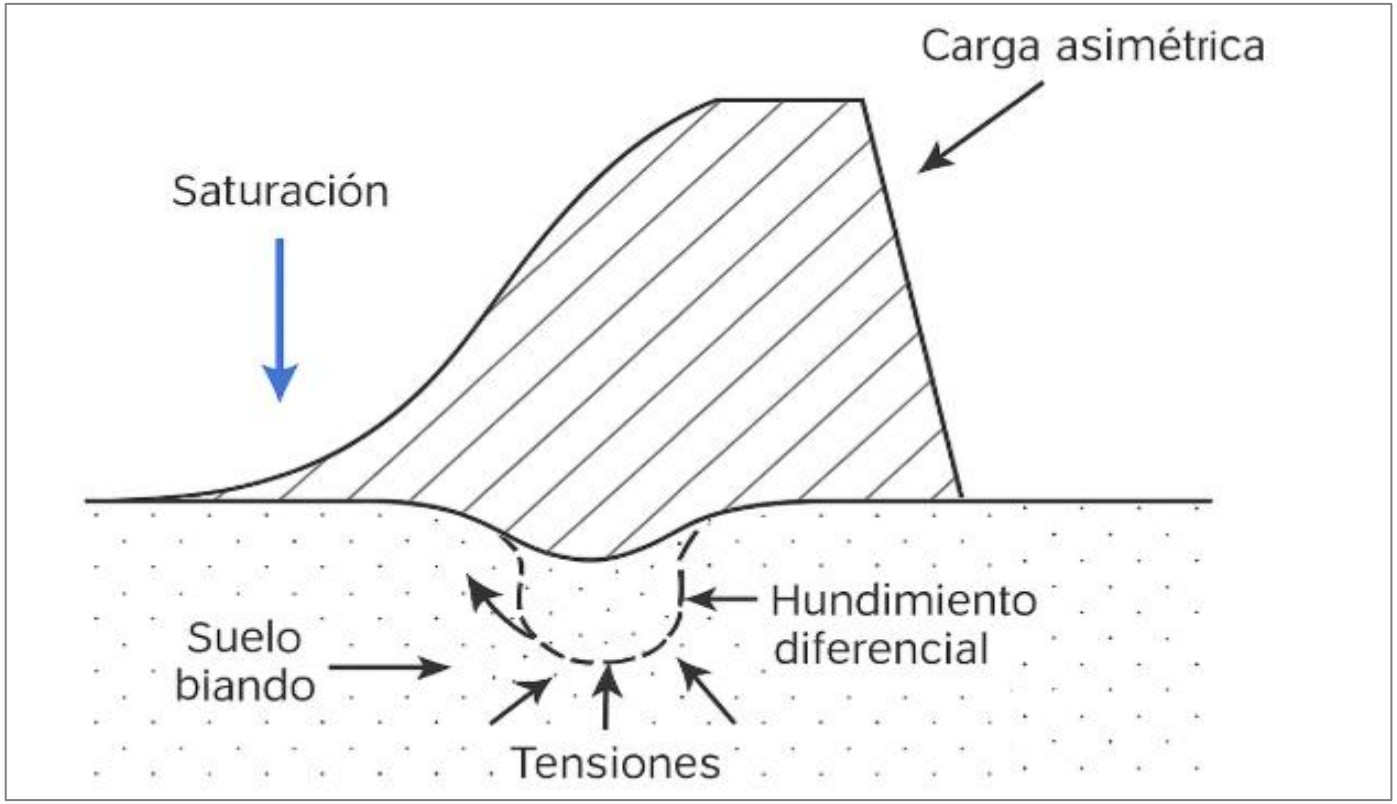


Figura 25: Esquema conceptual de inestabilidad por deformación de la base (hundimiento diferencial)

RelaveNet
A Community of Excellence

DEFORMACIONES SÍSMICAS

Corresponde a la disminución de la revancha y/o el coronamiento producto de grietas o deformaciones causadas por un sismo.

Este mecanismo se asocia a las presiones de poros de los materiales, la compacidad del muro y la tendencia contractiva de los materiales, las aceleraciones sísmicas y a la duración del sismo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
Mecanismos de falla de un TSF

DESBORDAMIENTO / REBALSE (OVERTOPPING)

Este mecanismo de falla se genera cuando el material contenido en la cubeta del depósito ya sea agua o relave, sobrepasa el coronamiento del muro.

Esto puede producir a su vez la erosión progresiva del muro, llevando a la falla total de éste.

Dentro de los eventos que gatillan este mecanismo se encuentran fallas en los canales perimetrales de captación, lluvias y deslizamientos hacia el interior del depósito.

Algunos de los parámetros críticos asociados corresponden a la geometría del muro (altura y revancha), distancia entre el muro y la laguna, caudales de ingreso y salida, y presencia de grietas en el coronamiento.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
2008-China - Desastre de Shanxi

En septiembre de 2008, la presa de relaves de una mina de mineral de hierro en el condado de Xiangfen, provincia de Shanxi, colapsó tras lluvias intensas, liberando grandes cantidades de lodo y residuos.

La tragedia dejó más de 250 personas muertas y muchas más heridas o desplazadas. Este incidente destacó la necesidad de reforzar las regulaciones de seguridad en China y de mejorar el monitoreo de las infraestructuras mineras.



Figura 26: Desastre de Shanxi 2008

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF
2024-Chile-Minera Las Cenizas-Cabildo



Figura 27: Deslizamiento muro de contención Minera Las Cenizas

A raíz de un intenso sistema frontal (junio 2024) que afectó a la zona centro-sur de Chile se produjo el derrumbe de relaves desde la Minera Las Cenizas en Peñablanca.

Incremento del agua superficial contenida en el depósito (Overtopping), por el exceso de lluvias, lo que provocó un deslizamiento en la parte superior del muro". Este hecho causó un escurrimiento de agua hacia las piscinas de contención, las cuales se saturaron y descargaron en la quebrada.

RelaveNet
A Community of Excellence

EROSIÓN INTERNA

La erosión interna ocurre cuando se genera un canal de flujo preferencial al interior del muro de contención, lo que puede traer consigo una falla local o masiva del muro.

Este mecanismo de falla se gatilla por incompatibilidad de la gradación de distintos materiales en contacto, el aumento del gradiente hidráulico en el depósito o el suelo de fundación, asentamientos diferenciales, variación del nivel freático o problemas en el sistema de drenaje.

Parámetros críticos asociados corresponden a la presión de poros en el muro y el terreno de fundación, evidencia de humedad o filtraciones en el talud aguas abajo, granulometría del muro, colmatación de drenes, entre otros.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Factores Técnicos Críticos que Aumentan el Riesgo de Falla en TSF (Operacionales y de mantenimiento)

Diseño geotécnico inadecuado

- ❖ Subestimación del nivel freático y presiones de poro.
  - Nivel freático elevado y drenaje deficiente → aumento de presión intersticial.
- ❖ Modelos que no consideran escenarios sísmicos realistas.

Caracterización insuficiente del suelo y materiales

- ❖ Contenido de finos elevado, tendencia a contractividad.
  - Contenido de finos elevado en relaves (por ej., < 10 µm en >50%) → mayor susceptibilidad a licuación.
  - Baja compactación del muro, presencia de materiales sueltos → menor resistencia al corte.
  - Densidad seca baja en el muro (<1.5 t/m^3) → condiciones críticas ante carga sísmica.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Factores Técnicos Críticos que Aumentan el Riesgo de Falla en TSF (Operacionales y de mantenimiento)

Fallas en sistemas de drenaje:

- ❖ Ineficiencia por colmatación o sobrediseño conservador.
- ❖ Incapacidad de disipar presiones intersticiales.

Método de construcción riesgoso:

- ❖ Construcción aguas arriba con bajos niveles de compactación.
  - ○ Métodos constructivos como aguas arriba en zonas sísmicas → riesgo estructural alto.
- ❖ Uso de materiales no controlados en el muro.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Factores Técnicos Críticos que Aumentan el Riesgo de Falla en TSF (Operacionales y de mantenimiento)

Monitoreo insuficiente o deficiente:

- Fallas en el sistema de monitoreo (piezometría, deformaciones) → ausencia de alertas tempranas.
- Ausencia de instrumentación piezométrica y de desplazamientos.
- Datos no registrados o mal interpretados.

Falta de mantención preventiva:

- Mantenimiento deficiente de drenes, canales y coronamiento → erosión o pérdida de capacidad hidráulica. Drenes cegados sin limpieza periódica.
- Ausencia de restauración del coronamiento.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Factores Técnicos Críticos que Aumentan el Riesgo de Falla en TSF (Operacionales y de mantenimiento)

Gestión deficiente de la laguna:

- ❖ Distancia muro-laguna inadecuada.
- ❖ Volúmenes de agua superiores al diseño.

Sobrecarga y operación fuera del plan:

- ❖ Peraltes ejecutados sin consolidación previa.
- ❖ Exceso de caudales sin análisis de estabilidad.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Asociación entre Mecanismos de Falla y Factores Técnicos/Operacionales

Tabla 9: Asociación de Mecanismos de fallas

MECANISMO DE FALLA	FACTORES ASOCIADOS
Licuación sísmica	Alto contenido de agua (saturación cercana al 100%)
	Baja densidad relativa del material depositado
	Materiales finos mal compactados
	Ausencia de drenaje o sistema ineficiente
	Eventos sísmicos sin sistema de alerta temprana o monitoreo piezométrico
	Suelo fundacional susceptible a licuar
Licuación estática	Material de baja resistencia al corte
	Sobrecarga estructural sin control del gradiente hidráulico
	Interacciones entre agua intersticial y partículas finas
	Cambios operacionales sin rediseño del muro
Inestabilidad de taludes	Taludes con pendiente elevada no conforme al diseño
	Mala compactación o heterogeneidad en capas
	Aumento progresivo de cargas sin control
	Erosión superficial y escurrimiento sin manejo
	Falta de cobertura vegetal o control de infiltración superficial
Inestabilidad del suelo fundacional	Suelos blandos o sin caracterización geotécnica
	No ejecución de mejoramiento de fundación
	Asentamientos diferenciales acumulativos
	Presencia de arcillas expansivas o arenas licuables
Deformaciones sísmicas	Sobrecargas dinámicas no contempladas
	Ausencia de juntas de dilatación o elementos flexibles
	Sistemas constructivos upstream en zonas sísmicas
	Vibración acumulada sin refuerzo estructural
Rebalse	Exceso de agua clara o mala gestión hidráulica
	Falta de canal de rebose o mal dimensionado
	Eventos de lluvia extraordinarios no considerados
	Operación sin monitoreo de niveles ni balance hídrico
Erosión interna (piping)	Drenes colmatados o inexistentes
	Gradientes hidráulicos elevados en zonas de fisuras
	Materiales dispersivos mal caracterizados
	Ausencia de filtros o control de presión intersticial en núcleo o fundación

Tema 4: Causas de Fallas de TSF

Lecciones clave de fallas reales

Tabla 10: Lecciones claves eventos catastróficos

EVENTO	LECCIÓN PRINCIPAL	APRENDIZAJE TÉCNICO
Brumadinho (Brasil 2019)	Saturación sin monitoreo - licuefacción	Control de presión intersticial es vital
Mount Polley (Canada 2014)	Fallo en diseño de fundación- Subestimación de fundación	Evaluación geotécnica inicial crítica
Samarco (Brasil 2015)	Diseño sin redundancia ni buffers	Diseño multibarrera
El Soldado (Chile 2010)	Rebalse por mal manejo de la playa y Sobrellenado del tranque	Manejo riguroso del balance hídrico

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 4: Causas de Fallas de TSF



Figura 28:
Modelo de Prevención de Fallas en TSF


RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Estándar MAC y GISTM

La gobernanza de los depósitos de relaves (TSF) ha evolucionado hacia un enfoque basado en consecuencias, más allá de lo estrictamente técnico. Esta transformación ha sido impulsada por fallas catastróficas como Fundão (2015) y Brumadinho (2019).

La revisión de marcos normativos internacionales

- Estándar Global para la Gestión de Relaves (GISTM)
- el marco MAC de Canadá,
- la normativa chilena (DS N°248)

permite identificar brechas y oportunidades para fortalecer la gestión de TSF.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Panorama Institucional Global sobre Gestión de Relaves

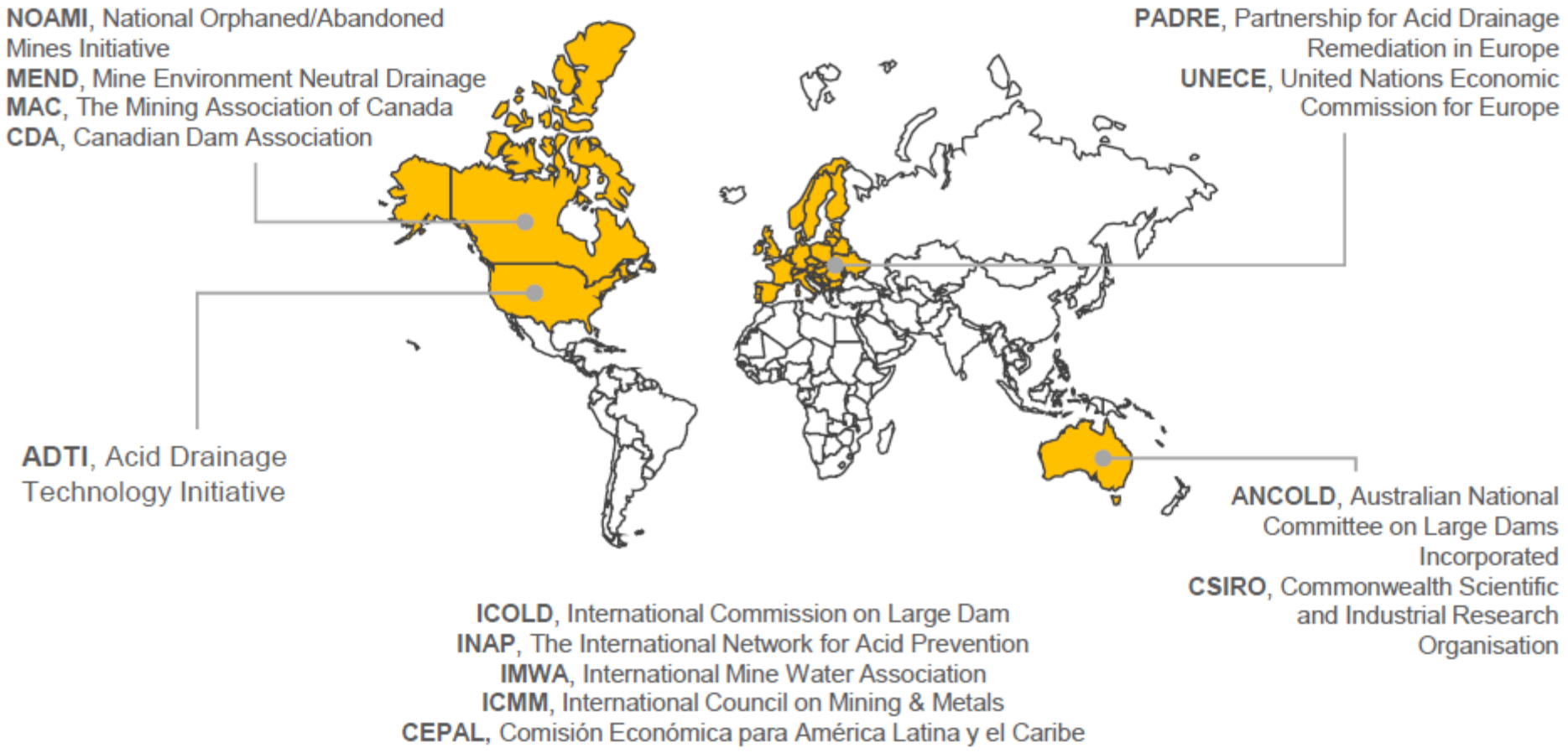


Figura 29: Cartografía institucional global, organizaciones, redes y organismos técnicos que han desarrollado estándares, guías y políticas para una gestión segura, sustentable y responsable de depósitos de relaves. (fuente SONAMI)

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Modelo Canadiense (MAC) y su Influencia Global

El marco canadiense desarrollado por la Mining Association of Canada (MAC) ha servido como base para el GISTM.

Incorpora
- revisión independiente
- monitoreo continuo
- gestión del cambio
- Participación

Desde 2017, es obligatorio para todas las minas asociadas al MAC.

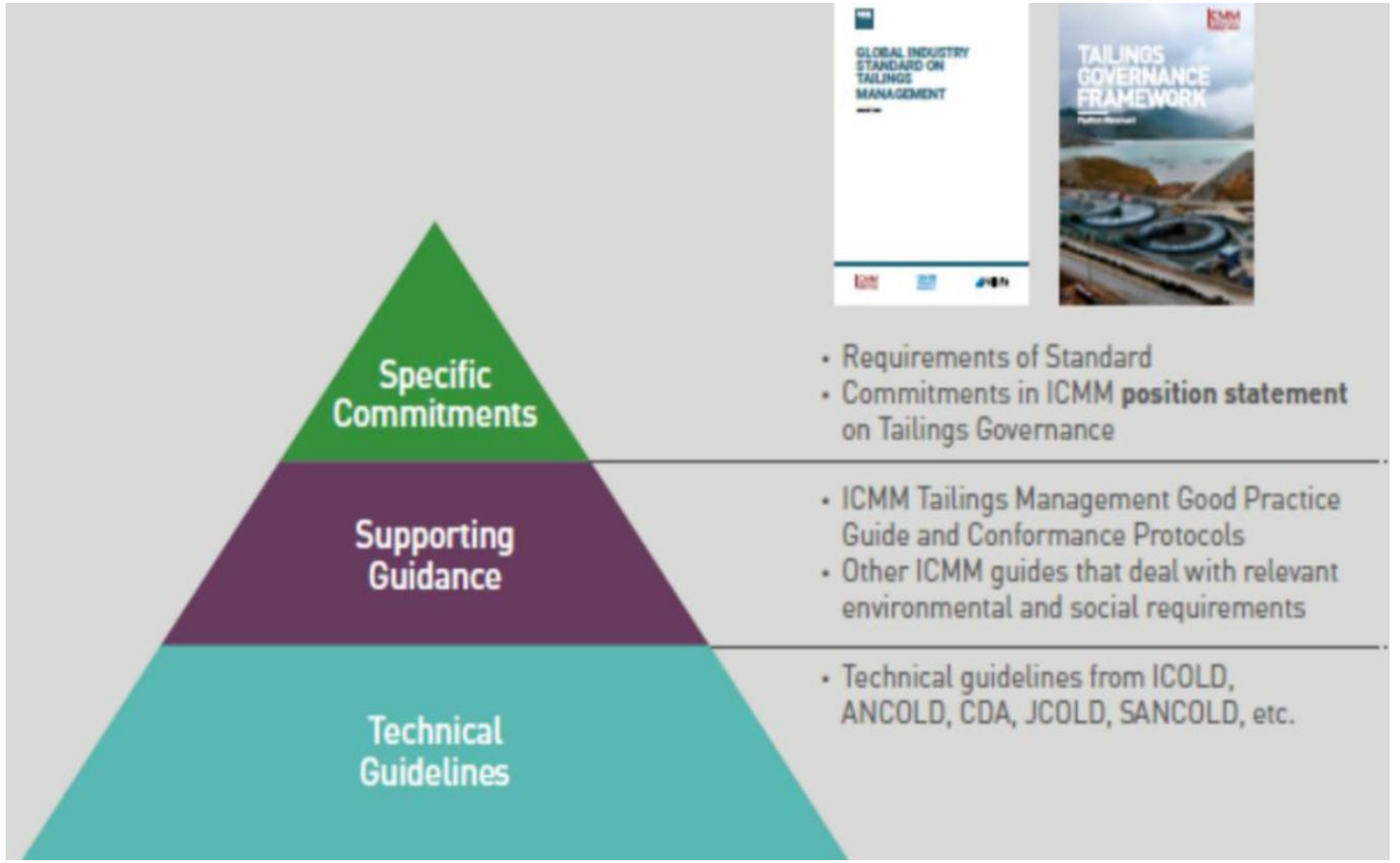


Figura 30
*E*structura jerárquica propuesta para la gestión de relaves bajo estándares como el GISTM y las guías del ICMM, destacando la gobernanza como componente central

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
GISTM

Propósito

Prevenir fallas catastróficas mediante una gobernanza sólida, una gestión proactiva del riesgo y el fortalecimiento de las capacidades institucionales del operador minero. El estándar también establece una política de tolerancia cero a fatalidades humanas y exige que los operadores asuman responsabilidad directa por la seguridad, incluso cuando existan vacíos regulatorios locales.

Alcance

Se aplica a todas las fases del ciclo de vida de las instalaciones de relaves —desde el diseño hasta el post-cierre— e incluye tanto depósitos activos como cerrados o inactivos bajo control del titular.

Enfoque

Basado en consecuencias, no en probabilidades. Impulsa una gestión centrada en la minimización del daño, reconociendo que el riesgo cero no es alcanzable, pero que el daño cero sí debe ser el objetivo rector.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Clasificación por Consecuencias

El GISTM introduce un sistema de clasificación de depósitos basado en el nivel de consecuencias potenciales **ante una falla.**

El enfoque por consecuencias prioriza la protección de las personas y del medio ambiente como principios rectores.

Esta clasificación está directamente vinculada con la intensidad de los requisitos del estándar, estableciendo mayores exigencias para depósitos con consecuencias más severas.

Tabla 11: Matriz de clasificación por consecuencia GISTM-2020

Clasificación de Consecuencia	Población Potencial en Riesgo	Pérdida Potencial de Vidas	Pérdidas Incrementales en el Medioambiente	Salud, Social y Cultural	Infraestructura y Economía
Baja	Ninguna	Ninguna esperada	Pérdidas a corto plazo o deterioro menor de hábitat o especies raras y en peligro	Efectos mínimos y sin alteración significativa a la salud humana. Sin interrupciones a patrimonio, comunidad o valores culturales	Pérdidas económicas bajas: zona con infraestructura limitada o servicios. < US$1M
Significativa	1 – 10	No especificada	Sin pérdidas significativas. Posible contaminación de agua o fauna sin efectos a la salud. Potencial de lixiviación bajo. Restauración posible entre 1 y 5 años	Disrupciones significativas en servicios o negocios. Baja probabilidad de efectos de salud. Pérdida de valores culturales o comunitarios menor	Pérdidas en rutas recreativas o laborales estacionales. < US$10M
Alta	10 – 100	Posible (1 – 10)	Deterioro significativo de hábitat crítico. Riesgo medio de drenaje ácido. Lixiviación moderada. Restauración difícil. Área afectada 10–20 km²	500 – 1.000 personas afectadas. Impacto cultural o patrimonial. Posibles efectos de salud a corto plazo	Pérdidas económicas altas. Infraestructura y transporte público afectados. Compensación o reubicación moderada. < US$100M
Muy Alta	100 – 1.000	Probable (10 – 100)	Pérdidas mayores de hábitat. Alto riesgo de toxicidad. Drenaje ácido severo. Restauración muy difícil. Área > 20 km²	>1.000 personas afectadas. Pérdidas patrimoniales mayores. Efectos de salud significativos y de largo plazo	Pérdidas muy altas. Afectación a servicios esenciales, almacenamiento peligroso. Reubicación significativa. < US$1B
Extrema	> 1.000	Muchas (> 100)	Pérdida catastrófica de hábitat crítico. Altamente tóxico. Amplio drenaje ácido. Área > 20 km². Restauración inviable	>5.000 personas afectadas. Daño a patrimonio irreemplazable. Efectos severos a la salud pública	Pérdidas extremas. Infraestructura crítica dañada. Altamente costoso. Muy alta reubicación. > US$1B

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Estructura Jerárquica del GISTM

El Estándar Global de Gestión de Relaves (GISTM) está organizado en una estructura jerárquica que articula compromisos obligatorios, guías de implementación y lineamientos técnicos, con el propósito de garantizar una gobernanza robusta y coherente a múltiples niveles.

- *6 Áreas/Tópicos*
- *15 Principios Rectores*
- *77 Requisitos obligatorios.*



Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

TÓPICO I
COMUNIDADES AFECTADAS

PRINCIPIO 1: Respetar los derechos de las personas afectadas por el proyecto y participar de manera significativa con ellas en todas las fases del ciclo de vida de la instalación de relaves, incluido el cierre.

TÓPICO II
BASE DE CONOCIMIENTO INTEGRADA

PRINCIPIO 2: Desarrollar y mantener una base de conocimiento interdisciplinaria para respaldar una gestión segura de relaves a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación, incluido el cierre.

PRINCIPIO 3: Utilizar todos los elementos de la base de conocimiento —social, ambiental, local, económica y técnica— para tomar decisiones informadas en todas las fases del ciclo de vida de la instalación de relaves, incluido el cierre.

RelaveNet
A Community of Excellence

TÓPICO III
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MONITOREO INSTALACIÓN DE RELAVES

PRINCIPIO 4: Desarrollar planes y criterios de diseño para la instalación de relaves que minimicen el riesgo en todas las fases de su ciclo de vida, incluido el cierre y post-cierre.

PRINCIPIO 5: Desarrollar un diseño robusto que integre la base de conocimiento y minimice el riesgo de falla para las personas y el medio ambiente en todas las fases del ciclo de vida de la instalación, incluido el cierre y post-cierre.

PRINCIPIO 6: Planificar, construir y operar la instalación de relaves para gestionar el riesgo en todas las fases de su ciclo de vida, incluido el cierre y post-cierre.

PRINCIPIO 7: Diseñar, implementar y operar sistemas de monitoreo para gestionar los riesgos en todas las fases del ciclo de vida de la instalación, incluido el cierre.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

TÓPICO IV
GESTIÓN Y GOBERNANZA

PRINCIPIO 8: Establecer políticas, sistemas y responsabilidades para respaldar la seguridad e integridad de la instalación de relaves.

PRINCIPIO 9: Nombrar y facultar a un Ingeniero Responsable. El Engineer of Record (EoR). Su rol es esencial para garantizar la trazabilidad y seguridad estructural del depósito.

PRINCIPIO 10: Establecer y mantener revisiones independientes de nivel apropiado como parte de un sistema sólido de aseguramiento y revisión de calidad de la gestión de relaves para todas las fases del ciclo de vida.

PRINCIPIO 11: Desarrollar una cultura organizacional que fomente la participación, el aprendizaje y la comunicación de problemas.

PRINCIPIO 12: Establecer un enfoque para abordar preocupaciones y mejorar continuamente los sistemas de gestión y gobernanza.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

TÓPICO V
RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS Y RECUPERACIÓN A LARGO PLAZO

PRINCIPIO 13: Prepararse para una respuesta de emergencia ante fallas en instalaciones de relaves.

PRINCIPIO 14: Implementar planes de recuperación a largo plazo en caso de fallas catastróficas en relaves.

TÓPICO VI
DIVULGACIÓN PÚBLICA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN

PRINCIPIO 15: Divulgar públicamente y proporcionar acceso a información sobre la instalación de relaves para apoyar un proceso de toma de decisiones informado.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Actores Claves del GISTM



RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Comparación con normativas (Chile, Canadá, Sudáfrica)

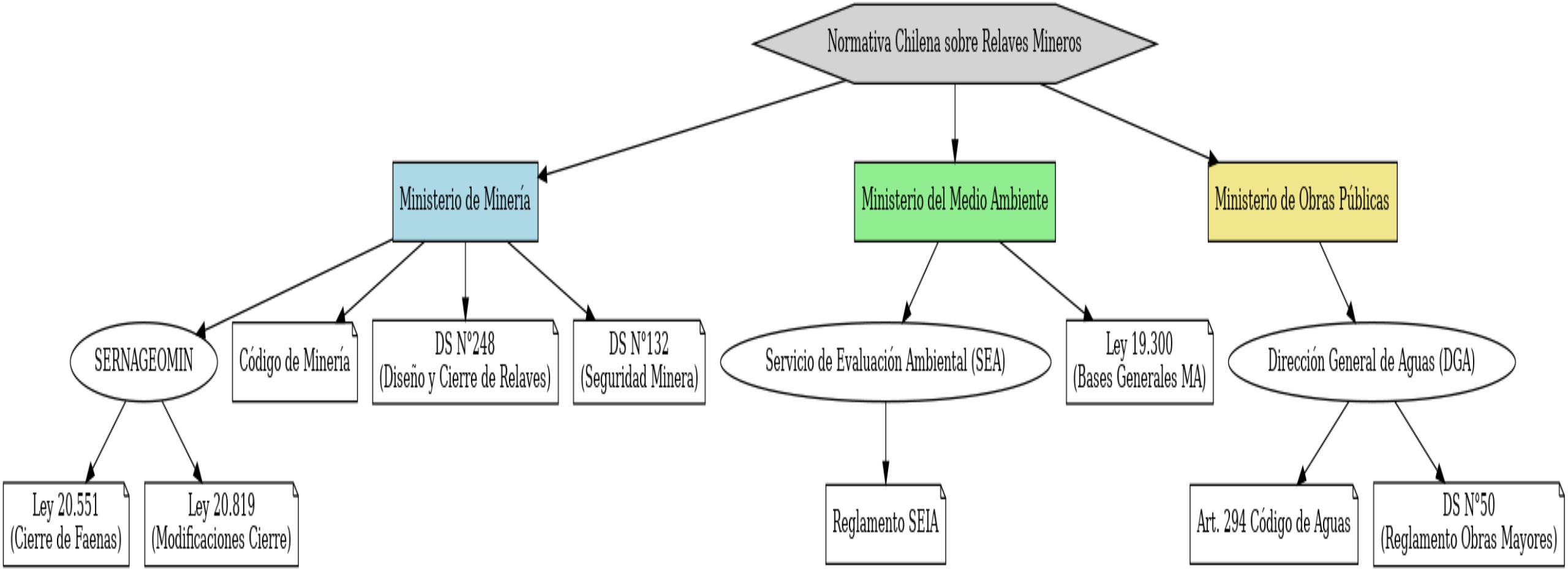
Tabla 12: Matriz comparativa de aspectos claves de control

País	Clasificación por consecuencias	Figura del EoR	Monitoreo en tiempo real	Participación comunitaria
Chile	✗ No exige	✗ No obligatorio	Parcial	Limitada
Canadá	☑ Implementada	☑ Obligatorio	☑ Implementado	☑ Alta
Sudáfrica	Parcial	Parcial	Parcial	Débil

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Legislación en Chile



RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales
Marco Legal General para Relaves en Chile

- El Código de Minería establece el marco legal para las concesiones mineras, incluyendo la protección de derechos y las obligaciones sobre el uso del suelo para depósitos.

- Decreto Supremo N°248 (2007): Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de TSF. Establece requisitos técnicos y administrativos.

- Este decreto aplica a toda faena minera que genere relaves como parte del proceso productivo.

- La supervisión técnica de proyectos de relaves recae en SERNAGEOMIN, que valida el diseño, ejecución y monitoreo.

https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29668

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Marco Legal General para Relaves en Chile

Protección a las personas y a la infraestructura

- Decreto Supremo N°132 (2004): Reglamento de seguridad minera.
  - Establece exigencias para proteger la vida e integridad física de trabajadores y terceros en faenas mineras.
  - Incluye lineamientos sobre:
    - Estabilidad estructural de TSF.
    - Señalización, accesos y restricciones en zonas con riesgo de falla.
    - Procedimientos frente a eventos críticos (como filtraciones o rebalses).

- Aplica a todas las instalaciones activas y en cierre, siendo fiscalizado por SERNAGEOMIN.

Este reglamento es complementario al DS 248, pero con énfasis en la prevención de accidentes fatales y contingencias.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Marco Legal General para Relaves en Chile

Marco normativo para el cierre seguro de TSF

- Ley N°20.551 (2011): Obliga a contar con un plan de cierre aprobado antes del inicio de operaciones mineras.
  - Este plan debe asegurar la estabilidad física y química del depósito en el largo plazo.
  - La ejecución del cierre debe mitigar los riesgos para la salud, seguridad y medio ambiente.

- Ley N°20.819 (2015): Modifica y refuerza la anterior.
  - Introduce mejoras en las definiciones de vida útil y garantía financiera, especialmente para pequeña y mediana minería.
  - Refuerza el rol técnico de SERNAGEOMIN y la aplicación de guías metodológicas.

Estas leyes exigen un monitoreo post-cierre y la constitución de un fondo de garantía, asegurando la sostenibilidad del depósito en el tiempo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Marco Legal General para Relaves en Chile

Tabla 13: Síntesis normativa en Chile

NORMA / LEY	ENFOQUE	AÑO	APLICACIÓN EN TSF
Código de Minería	Marco general concesiones y derechos mineros	1982	Uso de suelo y atribuciones legales
DS N°248	Diseño, construcción y cierre de TSF	2007	Requisitos técnicos y administrativos
DS N°132	Seguridad minera y protección de personas	2004	Medidas preventivas y control de fallas
Ley N°20.551	Plan de cierre obligatorio	2011	Estabilidad física y monitoreo
Ley N°20.819	Ajustes en garantías y definiciones	2015	Fomento al cierre seguro y transparente

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Enfoque Integrado Normativo - Agua, Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

El diseño, construcción y operación de los depósitos de relaves (TSF) en Chile debe cumplir con un conjunto normativo transversal, que integra legislación sectorial minera, ambiental e hidráulica. Este enfoque permite asegurar no solo la estabilidad física, sino también la sustentabilidad ambiental y la protección de recursos hídricos.

- Las obras mineras con embalses o tranques deben cumplir con:
  - Código de Aguas (Art. 294 y ss.)
  - Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente
  - Decreto 50 sobre Obras Hidráulicas Mayores

- Todo proyecto debe ser evaluado en su impacto ambiental y en su relación con cuerpos de agua naturales o artificiales.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Enfoque Integrado Normativo - Agua, Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente establece el marco de protección ambiental aplicable a los proyectos mineros, incluyendo relaves, exigiendo medidas de mitigación y evaluación previa mediante el SEIA.

- Promueve el desarrollo sustentable y el derecho a un medio ambiente libre de contaminación.
- Establece que los proyectos que incluyan obras hidráulicas (embalses, tranques) deben ser evaluados ambientalmente.
- Obliga a someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) cuando las obras puedan afectar cauces naturales o territorios protegidos.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Enfoque Integrado Normativo - Agua, Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

El Código de Aguas, en sus artículos 294 y siguientes, establece los requisitos para la construcción de obras hidráulicas vinculadas a proyectos mineros, como depósitos de relaves con capacidad significativa o cercanía a zonas urbanas.

- Art. 294: obras que requieren aprobación:
  - Embalses > 50.000 m^3 o > 5 m de altura.
  - Acueductos > 2 m^3/s.
  - Obras próximas a zonas urbanas.

- Art. 295: condiciones técnicas que deben cumplir las obras hidráulicas en cuanto a proyecto, construcción y operación.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Enfoque Integrado Normativo - Agua, Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

El Decreto 50 del MOP (2015) especifica las condiciones técnicas para la construcción y operación de obras hidráulicas mayores. Este reglamento se aplica directamente a instalaciones como TSF que contienen embalses u obras de contención de agua o lodos.

- Define condiciones técnicas para proyecto y operación.
- Obliga a validación por la Dirección General de Aguas (DGA).
- Requiere demostrar estabilidad hidráulica, estructural y funcional.
- Refuerza la coordinación entre el MOP y el Ministerio de Minería para obras integradas en faenas mineras.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tema 5: Normativas y Estándares Internacionales

Enfoque Integrado Normativo - Agua, Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

Junto con las normas técnicas e hidráulicas, existen instrumentos complementarios como el Reglamento del SEIA y leyes actualizadas que fortalecen el control ambiental sobre instalaciones mineras con TSF.

- Reglamento del SEIA: detalla las etapas de evaluación, participación ciudadana y criterios técnicos.
- Ley 20.417: refuerza la institucionalidad ambiental, creando la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y los Tribunales Ambientales.
- Ley REP y PAS: regulan residuos y responsabilidad extendida del productor, con implicancia en pasivos mineros.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones_Definición de Relaves

- ✓ Los relaves no son simples residuos: son subproductos complejos con propiedades físico-químicas que condicionan directamente la seguridad, estabilidad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

- ✓ Su caracterización integral es crítica: conocer su granulometría, contenido de humedad, reología y composición química permite tomar decisiones fundamentadas en diseño, manejo hidráulico y prevención de impactos.

- ✓ La estabilidad física y química es un requisito estratégico, no solo técnico: un relave mal manejado puede generar drenaje ácido, colapsos estructurales y pérdida de licencia social.

- ✓ El comportamiento como fluido no-newtoniano debe ser considerado en el diseño de transporte, disposición y recuperación de agua.

- ✓ La gestión de relaves debe estar integrada al ciclo completo de vida del proyecto minero, desde el diseño hasta el post-cierre, con monitoreo continuo.

Conclusiones_Clasificación Depósitos de Relaves

- ✓ La forma de construcción del tranque (upstream, centerline, downstream) define su estabilidad estructural y el riesgo sísmico. En Chile, el método aguas arriba está prohibido por su peligrosidad.

- ✓ El estado físico del relave determina su forma de disposición: desde pulpas convencionales hasta relaves filtrados, cada tipo tiene implicancias en estabilidad, consumo hídrico y mantenimiento.

- ✓ La disposición en superficie, subacuática, filtrada o co-disposición responde a múltiples variables: geografía, clima, restricciones regulatorias y presión social.

- ✓ Debe considerarse el ciclo de vida, entorno geográfico y condiciones climáticas para elegir el diseño más adecuado de TSF.

- ✓ La comparación técnica, económica y ambiental muestra una tendencia clara hacia tecnologías más seguras y sostenibles, como el filtrado y el apilamiento en seco.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones_Comp.Técnica, Económica y Ambiental

- ✓ Estabilidad, drenaje y operación son los pilares técnicos del diseño de TSF: cada uno influye directamente en la seguridad y eficiencia de la instalación.
- ✓ El control de playas y balance hídrico es vital para prevenir rebalses, erosión interna y pérdidas operacionales.
- ✓ Desde el punto de vista económico, los relaves filtrados implican una mayor inversión inicial, pero un menor costo operativo y un riesgo reducido a largo plazo.
- ✓ Ambientalmente, los depósitos filtrados ofrecen una reducción sustancial en la huella hídrica y el riesgo de contaminación, siendo ideales para zonas áridas.
- ✓ La tendencia global y nacional es hacia tecnologías de disposición seca, motivada por eficiencia hídrica, regulaciones y exigencias sociales.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones_ Causas de Fallas en TSF

- ✓ Las fallas de TSF tienen consecuencias catastróficas y multidimensionales: pérdidas humanas, daño ambiental, sanciones y pérdida de la licencia social.

- ✓ Los principales mecanismos de falla son identificables y prevenibles: licuefacción, inestabilidad de taludes, rebalses, erosión interna y fallas de fundación.

- ✓ Factores críticos incluyen el mal diseño, drenaje deficiente, monitoreo insuficiente y falta de mantenimiento preventivo.

- ✓ Ejemplos reales como Brumadinho, Shanxi y Las Cenizas refuerzan la necesidad de una gestión proactiva y una cultura de seguridad robusta.

- ✓ El enfoque debe ser preventivo y basado en el ciclo de vida, integrando monitoreo automatizado, control geotécnico y planes de contingencia.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones_Normativas y Estándares Internacionales

- ✓ La gobernanza de relaves ha evolucionado a un enfoque basado en consecuencias, donde la protección de personas y medio ambiente es prioritaria.

- ✓ El estándar GISTM representa un marco robusto, con 15 principios y 77 requisitos que abarcan desde comunidades hasta monitoreo y divulgación pública.

- ✓ Chile cuenta con un marco normativo integral, destacando el DS 248, DS 132 y las leyes 20.551 y 20.819, que exigen control técnico y ambiental en todo el ciclo de vida del depósito.

- ✓ Existe una fuerte interacción entre la legislación minera, ambiental e hidráulica: el cumplimiento cruzado de normativas asegura estabilidad, sustentabilidad y responsabilidad legal.

- ✓ El marco institucional global exige trazabilidad, transparencia y mejora continua, por lo que los operadores deben asumir un rol activo más allá del cumplimiento mínimo legal.

RelaveNet
A Community of Excellence

Cierre

Este primer módulo nos ha permitido construir una base conceptual sólida sobre qué son los relaves, cómo se clasifican y por qué su gestión representa un desafío técnico y ambiental de alta complejidad.

Hemos explorado las formas de disposición, los mecanismos más frecuentes de falla, y las principales normativas que regulan su diseño y operación.

Más allá de la ingeniería, lo aprendido nos invita a comprender los depósitos de relaves como sistemas integrales, que requieren no solo cálculos estructurales, sino también responsabilidad institucional, prevención activa y transparencia frente a las comunidades.

Este conocimiento será esencial para abordar con mayor profundidad, en los próximos módulos, las tecnologías emergentes, los desafíos de estabilidad y las estrategias sostenibles de disposición.

El estándar ya no es cumplir con la norma: el estándar es anticiparse, mitigar y comunicar con rigurosidad técnica y responsabilidad ética.

Gracias por su Atención

RelaveNet
A Community of Excellence