Módulo 2 – Tema 1 –

Tecnologías convencionales y alternativas para la gestión de agua en relaves mineros

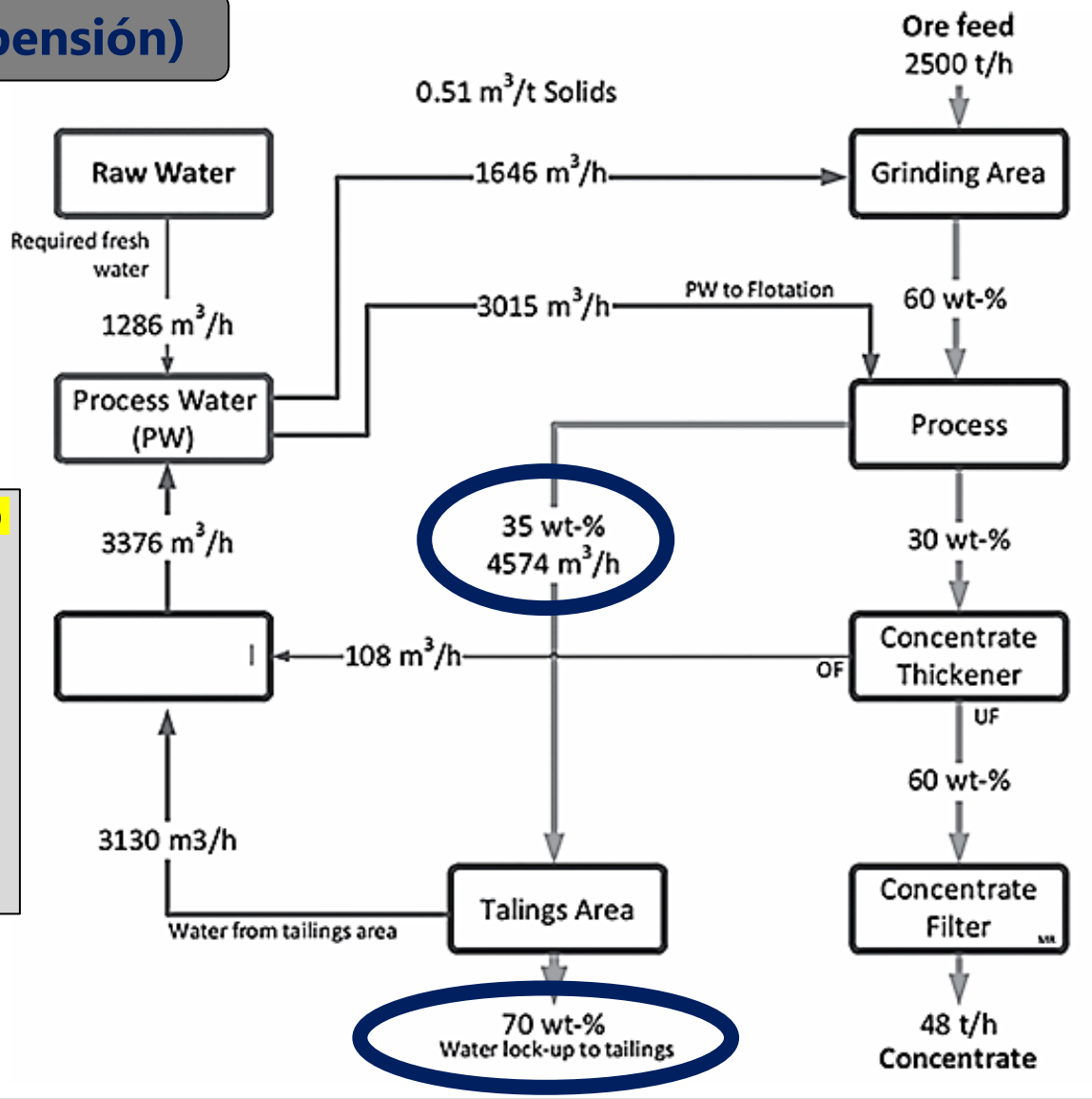
- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence

Relaves Convencionales (pulpa en suspensión)

DESVENTAJAS DE UNA PLANTA QUE USA EL MÉTODO TRADICIONAL DE RELAVES EN SUSPENSIÓN (PULPA LÍQUIDA).

- **Mucha agua fresca entra** a la planta (flecha que viene de “Raw Water”).
- Parte del agua se recicla, pero **una gran porción (≈ 70 %) queda atrapada** en el depósito de relaves y no vuelve nunca más al proceso (óvalo azul de abajo).
- Como esa agua se pierde, la planta **tiene que pedir más agua nueva todo el tiempo**, lo que aumenta el consumo y los costos.
- Además, ese exceso de agua obliga a mantener un estanque grande y diques altos, lo que ocupa más terreno y genera más riesgos.



RelaveNet
A Community of Excellence

Características de Relaves Convencionales



CARACTERÍSTICAS	PARÁMETRO	RANGO - VALOR TÍPICO
Físicas	Tamaño medio de partícula (d_{50}) [µm]	50 – 90 µm (80 % < 150 µm)
Fracción < 75 µm [% p/p]	50 – 70 %	Define la reactividad geoquímica y la tendencia a licuefacción
Gravedad específica de sólidos (Gs) [–]	2,60 – 2,80	Similar a arenas de cuarzo-feldespato; valores mayores cuando hay sulfuros y óxidos de Fe
Humedad en descarga [% peso]	30 – 38 %	Determina opción de disposición: convencional, espesada, filtrada
pH en pasta fresca [–]	7,5 – 8,0 (puede bajar a 2-3 si se oxidan sulfuros)	El pH gobierna movilidad de metales y generación de drenaje ácido
Conductividad eléctrica (25 °C) [µS cm^{-1}]	250 – 600	Indicador indirecto de sales disueltas y aporte de reactivos
Químicas (óxidos mayoritarios, % peso)	SiO_2	55 – 60
Al_2O_3	10 – 15	Proporcional a minerales de arcilla y feldespato
Fe_2O_3	6 – 15	Refleja pirita, magnetita y óxidos de hierro; alta influencia en color y densidad
CaO	4 – 8	Efecto amortiguador de acidez; proviene de calcita-dolomita o adición de cal
Elementos traza potencialmente tóxicos	As, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg [mg kg^{-1}]	50 – >10 000 (dependiendo del yacimiento)
Azufre total S [%]	0,5 – 4	Cuanto mayor el S (pirita/pirrotita) mayor riesgo de drenaje ácido
Carbonato equivalente $CaCO_3$ [%]	5 – 12	Capacidad de neutralización potencial; clave en balance ácido-base

RelaveNet
A Community of Excellence

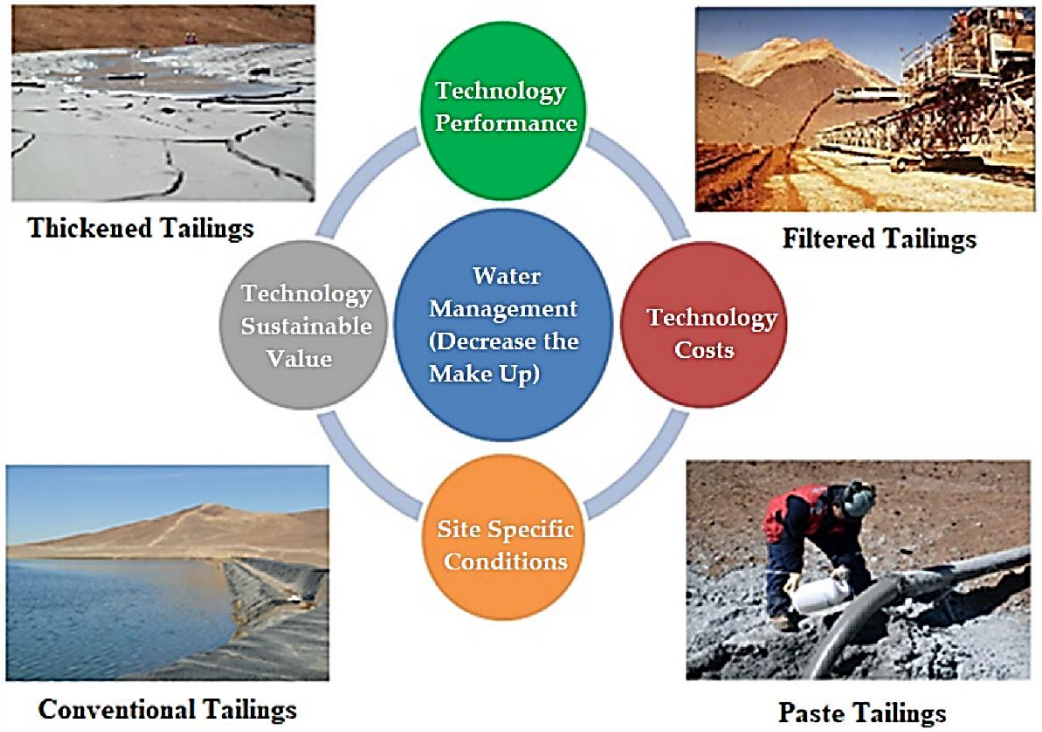
Tecnologías Alternativas para la Gestión Hídrica en Relaves

CATEGORÍA	TECNOLOGÍA	% RECUPERACIÓN DE AGUA TÍPICA*	PRINCIPIO Y VENTAJAS PRINCIPALES	CONSIDERACIONES / LIMITACIONES
Convencional	Depósito convencional con barcaza o torre de decantación	60 – 75 % en TSF bien operados	El agua libre se decanta desde el estanque superficial y se bombea a la planta; sistema simple y de bajo CAPEX.	Requiere grandes presas y cuerpos de agua; mayor riesgo de licuefacción y fallas si se pierde control del estanque.
Convencional	Clasificación con hidro-ciclones y reutilización del rebose	44 – 56 % (casos industriales)	Separación de arenas (> 45 µm) para levantar diques; el rebose regresa como agua de proceso.	Eficiencia sensible a la granulometría y al % sólidos; requiere manejo de finos remanentes.
Alternativa (alta densidad)	Espesamiento de alta densidad (HDTT)	55 – 70 % (pulpas 50–65 % sólidos)	Deep-cone o high-density thickeners concentran la pulpa, reduciendo el volumen de agua almacenada y la huella del embalse.	Viscosidad elevada → bombeo con desplazamiento positivo y mayores consumos de floculante.
Alternativa (pasta)	Relaves tipo pasta	75 – 95 % (reclamación global en sistemas de dos etapas)	Paste thickeners generan suspensiones no-newtonianas (> 65 % sólidos) que se depositan en capas autosoportantes; minimizan el estanque.	Requiere bombas de pistón/tornillo y control reológico; limitaciones en climas fríos por pérdida de temperatura.
Alternativa (filtrado)	Filtrado a presión/vacío + Dry Stack	> 90 % (torta 80 – 92 % sólidos)	Filtros prensa, discos o banda producen «cake» transportable y apilable en seco; elimina virtualmente el agua libre y reduce el riesgo catastrófico.	CAPEX y OPEX altos; capacidad limitada por finos ultrafinos y abrasión de telas.
Emergente	Hydraulic Dewatered Stacking (HDS)	≥ 80 % (planta piloto El Soldado)	Combina arenas gruesas de CPR como medio filtrante dentro del propio TSF, acelerando drenaje y consolidación sin filtros mecánicos.	Tecnología en fase piloto; requiere disponibilidad de arenas gruesas y modelado geotécnico detallado.

* Rangos orientativos reportados en literatura reciente; deben validarse mediante pruebas de laboratorio y balance hídrico del yacimiento antes de la ingeniería de detalle.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías Alternativas para la Gestión Hídrica en Relaves

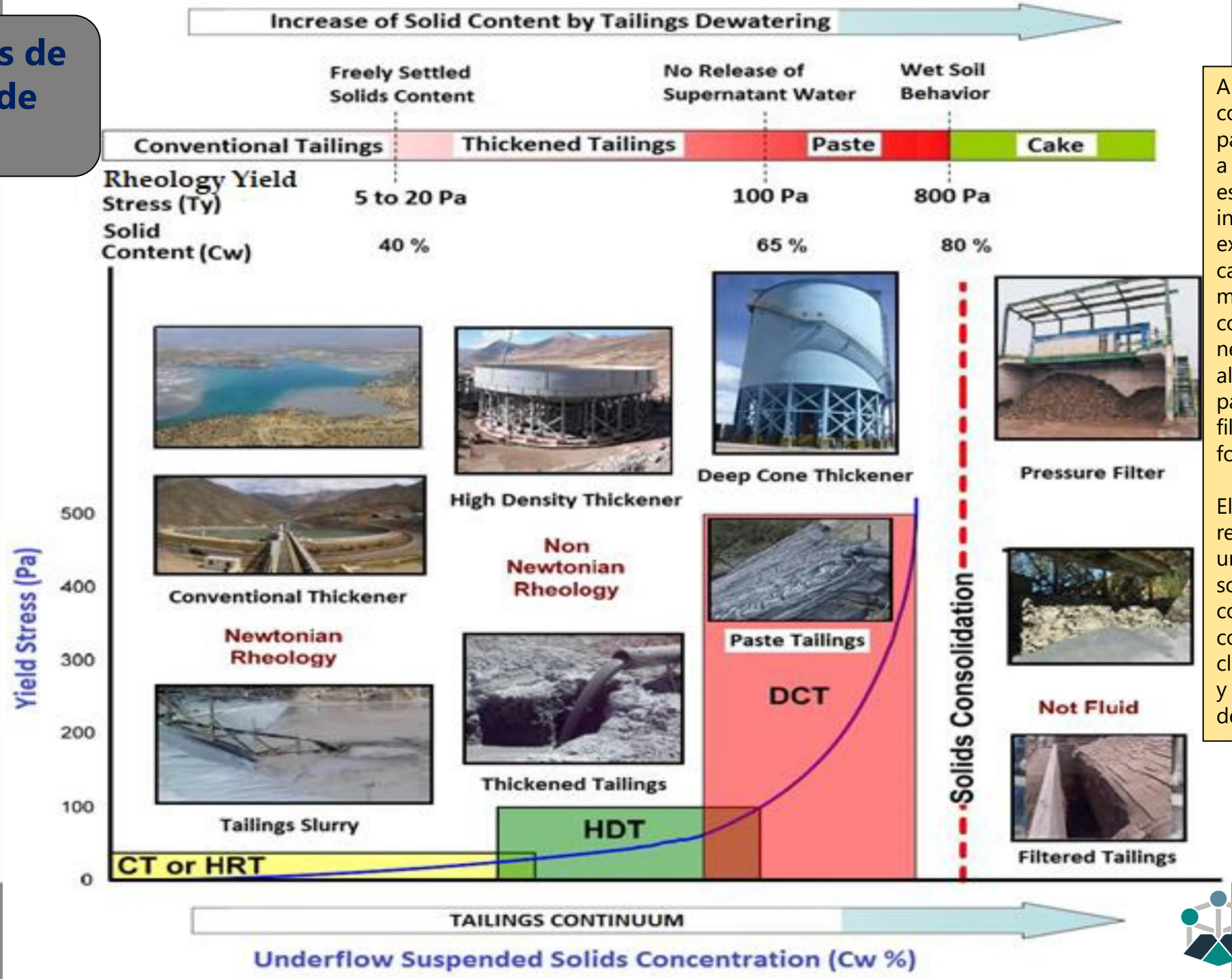


MÉTODO DE DISPOSICIÓN0	% SÓLIDOS EN PESO	COMENTARIOS TÉCNICOS RELEVANTES
Pulpa convencional (slurry descargada al depósito)	30 – 55 %	Flujos bombeables con baja viscosidad; se requiere gran embalse para decantación y recuperación de agua. Riesgo alto de segregación y licuefacción.
Relave espesado (high-density / thickened)	50 – 70 %	Generado en espesadores de cono profundo; menor superficie inundada y mayor recuperación hídrica. Permite transporte por tubería con bombas centrífugas o desplazamiento positivo.
Relave tipo pasta	65 – 80 % (frecuente 70 – 85 %)	Suspensión no newtoniana de alto rendimiento; requiere bombas de pistón o tornillo y deposición en capas con ángulos pronunciados. Reduce dramáticamente el volumen de agua libre.
Relave filtrado / Apilamiento en seco (dry-stack)	80 – 92 % (humedad 8 – 20 %)	"Cake" autoportante descargado por filtros prensa, banda o disco; se transporta con correas o camiones y se apila en capas compactadas. Máxima recuperación de agua (> 90 %) y menor riesgo de falla catastrófica.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías de desagüe de relaves

Figura. Continuo reológico y tecnologías de desagüe de relaves



A medida que la concentración de sólidos pasa de ≈ 40 % (pulpa fluida) a > 80 % (torta filtrada), el esfuerzo de fluencia se incrementa de forma exponencial y obliga a cambiar la estrategia de manejo: espesadores convencionales para pulpas newtonianas, espesadores de alta densidad/cono profundo para relaves espesados, y filtros de presión o vacío para formar "cake" autoportante.

El punto de transición reológico (> 100 Pa) marca el umbral donde desaparece el sobrenadante y el relave comienza a comportarse como un suelo consolidado, clave para eliminar la laguna y maximizar la recuperación de agua.

RelaveNet
A Community of Excellence

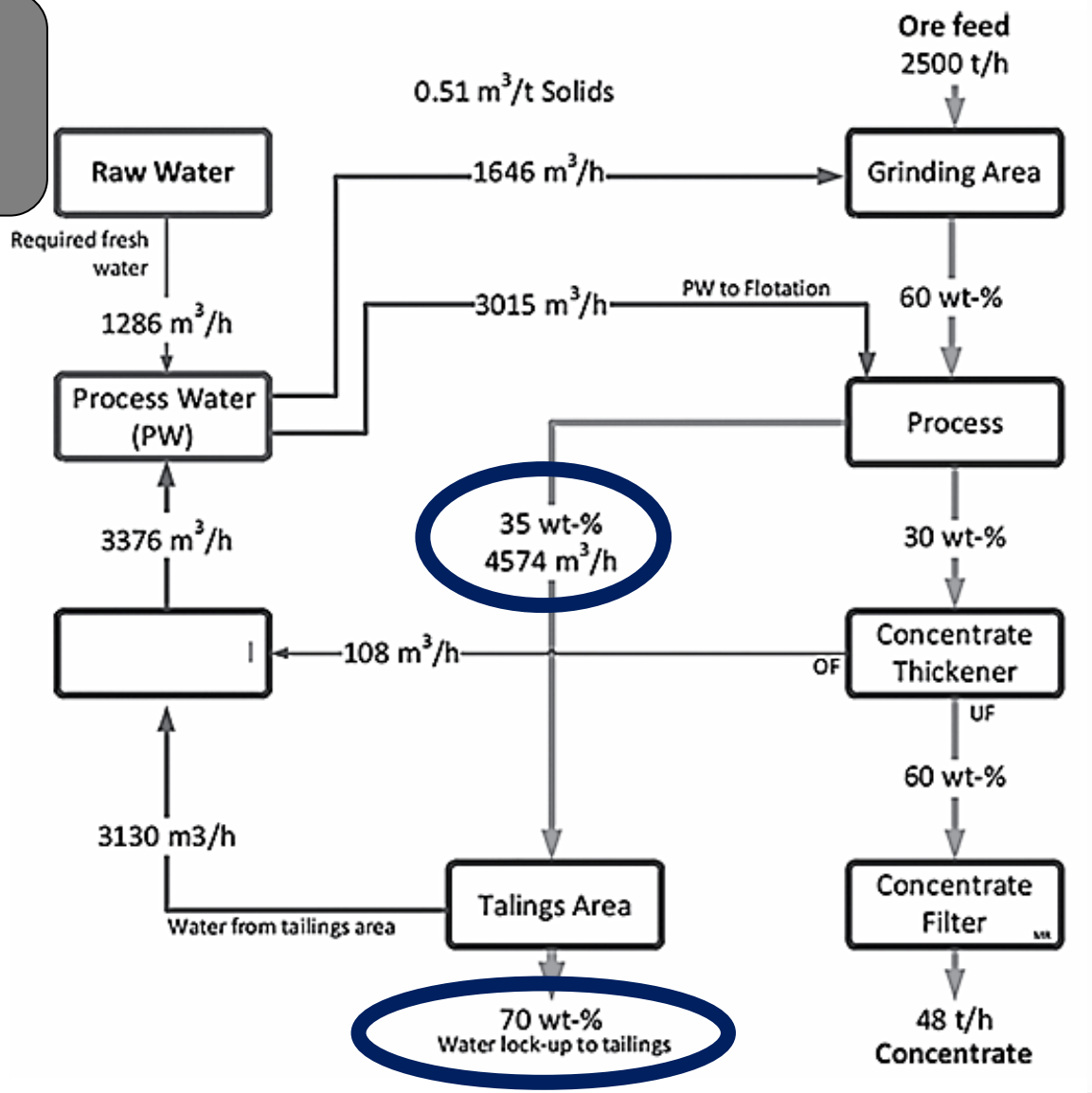
REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA SEGÚN LA TECNOLOGÍA (Gunson, 2013)

Escenario	Descripción	Consumo de agua	Extracción de agua m³/t de mineral procesado (considerando agua con ROM de 1,020 m³/d)
1. Caso base	Concentrador convencional	100% (38,955 m³/d)	0.76
2. Caso base con conservación de agua	Concentrador convencional y reducción en las pérdidas por evaporación	↓ 87% (33,822 m³/d)	↓ 0.66
3. Caso de relaves en pasta	Concentrador convencional y disposición de relaves en pasta	↓ 79% (30,682 m³/d)	↓ 0.59
4. Caso de relaves filtrados	Concentrador convencional y disposición de relaves filtrados	↓ 42% (16,491 m³/d)	↓ 0.31
5. Caso de pre-clasificación de mineral	Concentrador convencional y 20% de rechazo de mineral	↓ 82% (32,096 m³/d)	↓ 0.62
6. Caso de reducción combinada de agua	Concentrador convencional y reducción en las pérdidas por evaporación, así como 20% de rechazo de mineral y disposición de relaves filtrados	↓ 28% (10,878 m³/d)	↓ 0.2

Pérdida de Agua	Escenario 1 (m³/día)	Escenario 2 (m³/día)	Escenario 3 (m³/día)	Escenario 4 (m³/día)	Escenario 5 (m³/día)	Escenario 6 (m³/día)
Supresión de polvo en carreteras	3,520	757	3,520	3,520	3,520	757
Consumo humano	58	3.3	58	58	58	3
Estanque de agua cruda - Evap.	2.2	0	2.2	2.2	2.2	0
Estanque de agua de proceso - Evap.	3.4	0	3.4	3.4	3.4	0
Supresión de polvo en trituradora primaria	360	50	360	360	360	50
Supresión de polvo en pila de acopio	120	0	120	120	120	0
Celda de flotación - Evap.	6.7	0	6.7	6.7	6.7	0
Espesador de concentrado - Evap.	1.2	0.0	1.2	1.2	1.2	0
Concentrado Final	89	60	89	89	88	59
Espesador de relaves - Evap.	0	0	30.9	30.9	0	1.5
Relaves retenidos	20,792	20,792	20,792	12,299	16,573	9,803
Evaporación en playa	9312	9312	5,698	9312	7,422	0
Evaporación en estanque	1,890	47	0	0	1,506	0
Rehumectación de playa	2,800	2,800	0	0	2,232	0
Rechazos de pre-clasificación	0	0	0	0	204	204
TOTAL	**38,955**	**33,822**	**30,682**	**16,491**	**32,096**	**10,878**

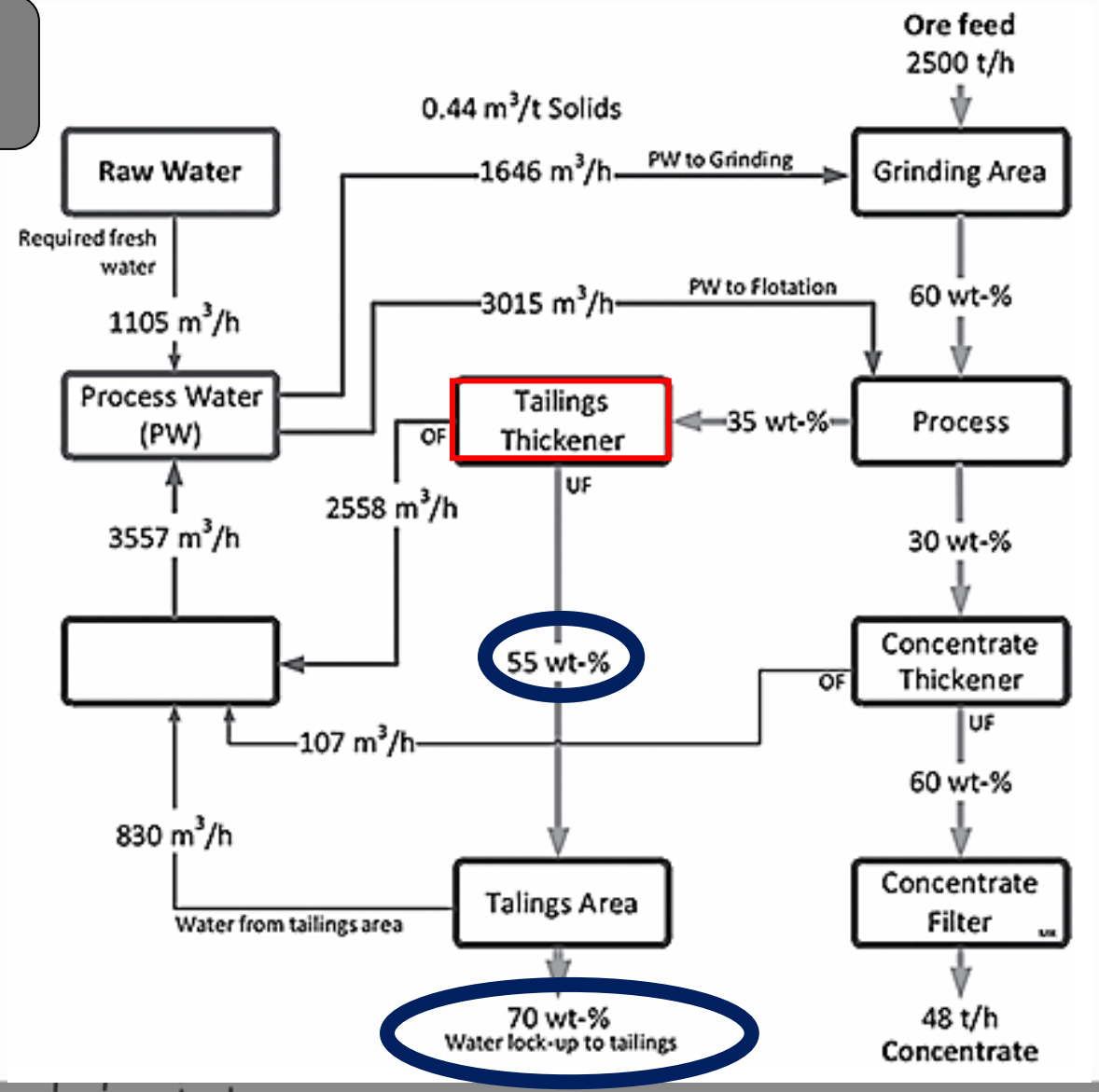
RelaveNet
A Community of Excellence

1. Tipo de Relaves convencionales en suspensión



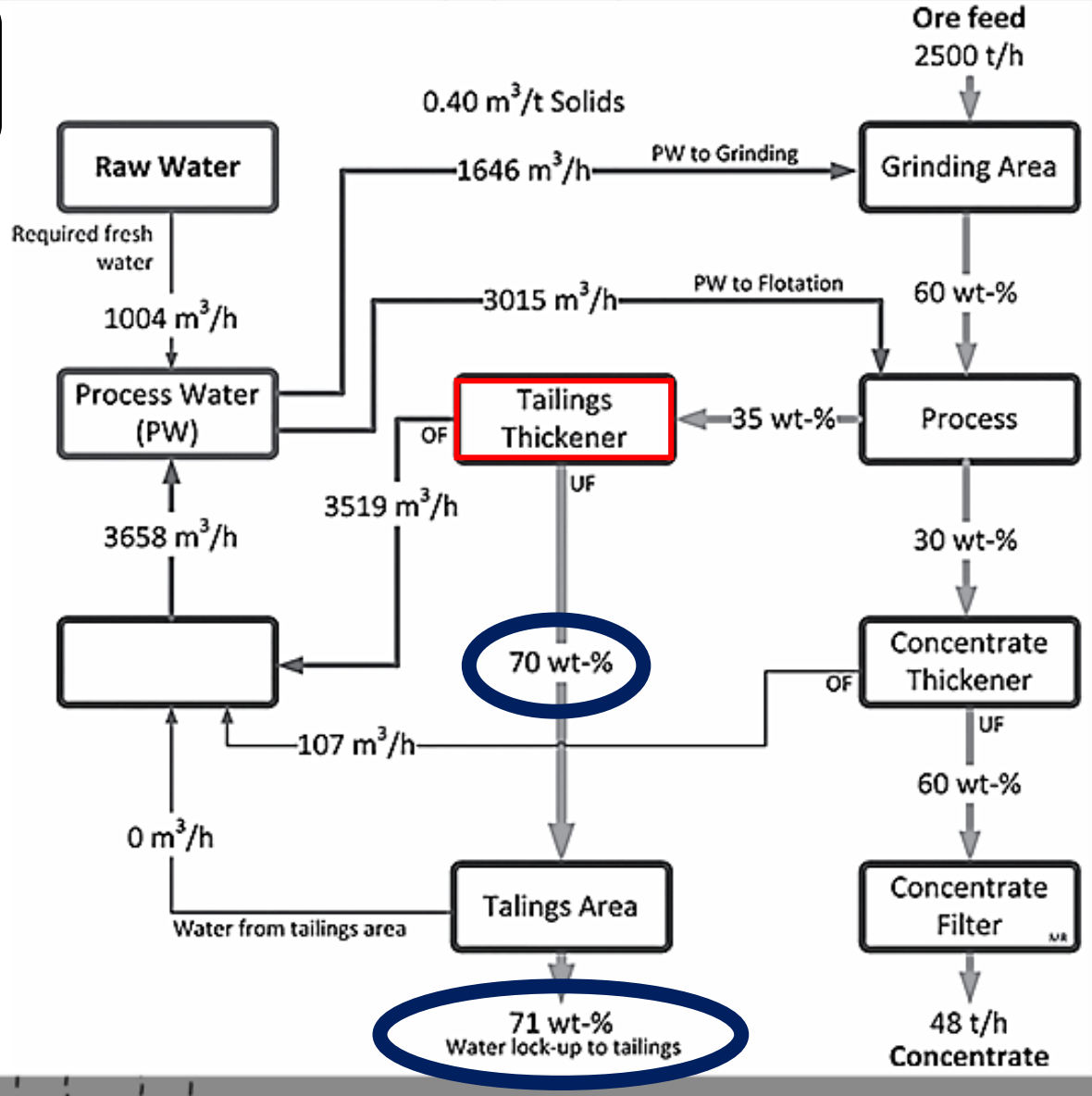
RelaveNet
A Community of Excellence

3. Tipo de Relaves espesados



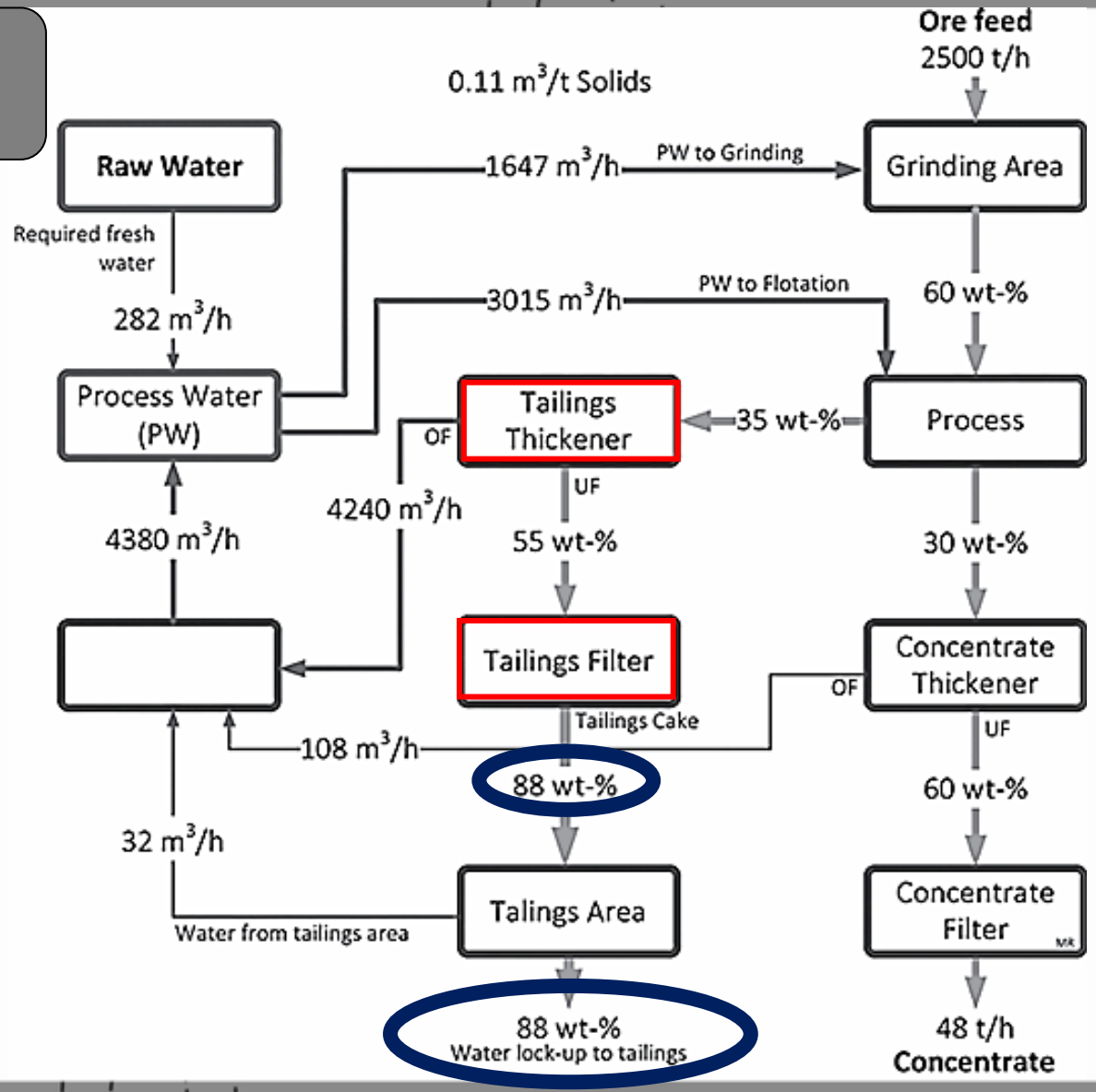
RelaveNet
A Community of Excellence

3. Tipo de Relaves en pasta



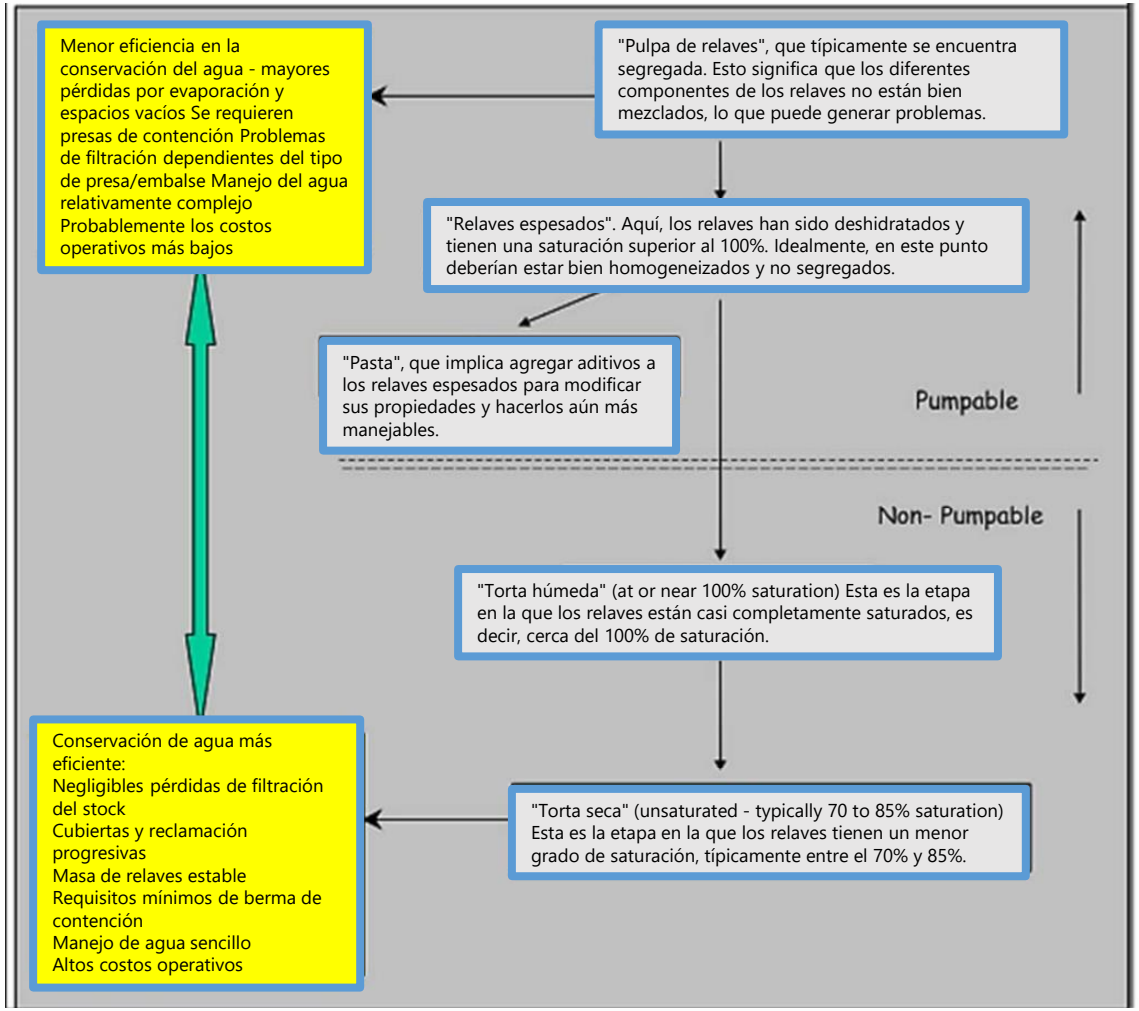
RelaveNet
A Community of Excellence

4. Tipo de Relaves filtrados



RelaveNet
A Community of Excellence

HUMEDAD DE LOS RELAVES SEGÚN TECNOLOGÍA:
De Relaves Bombeables a Relaves Secos



Cuanto mayor es el contenido de sólidos, menores son las pérdidas de agua y más sencillas las exigencias de contención.

Una pulpa espesa exige inversiones de capital y costos operativos progresivamente superiores.

La selección de la alternativa adecuada debe, por tanto, equilibrar la disponibilidad de agua, los requisitos regulatorios y las condiciones topográficas de cada faena, asegurando siempre la viabilidad técnico-económica y la sostenibilidad ambiental de la instalación de relaves.

RelaveNet
A Community of Excellence

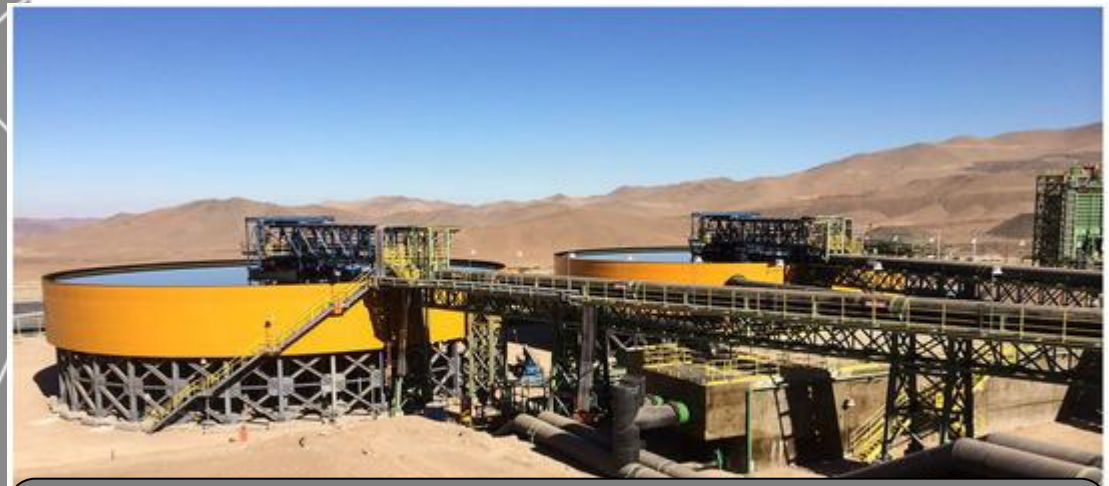
“EVOLUCIÓN DE LOS ESPESADORES EN LA GRAN MINERÍA CHILENA”



Espesadores convencionales de relaves en la mina El Teniente, Chile.



Espesadores de alta tasa de relaves en la mina Los Pelambres, Chile.



Espesadores de alta densidad de relaves en la mina Cerro Negro Norte, Chile.



Espesador de cono profundo de relaves en la mina Las Cenizas, Chile.

RelaveNet
A Community of Excellence