



TALLER DE ANÁLISIS

CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES VALIOSAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES – ASPECTOS ESENCIALES A CONSIDERAR

JUAN RAYO P. – DIRECTOR
JRI INGENIERÍA S.A.

12 MAYO 2021

INTRODUCCIÓN (1 de 3)

La valorización de especies de valor en depósitos de relaves está circunscrito a lo que la Autoridad Minera denomina como “Minería Secundaria”.

La Minería Secundaria (**MS**), corresponde al retratamiento económico de los residuos mineros producto de la “Minería Primaria” (**MP**), ya sea proveniente de minería de rajos o de minería subterránea.

Actualmente, Chile tiene **MS** en División El Teniente, con la operación de MVC para relaves frescos y antiguos, también en Candelaria con la extracción de fierro magnético por CAP, más el retratamiento de polvos de fundición por Ecometales y el retratamiento de ripios por al menos 5 empresas mineras.

Si valorizamos toda la producción de **MS** en Chile, ésta no alcanza a ser el 1% del valor de la **MP**. En cambio, en países como Sudáfrica y China se ha reportado años en que la proporción de valor de la **MS** es superior a un 20% de **MP**.

INTRODUCCIÓN (2 de 3)

Chile tiene una enorme abundancia de depósitos de residuos, el suscrito ha calculado por data pública y propia, con benchmarking confiables, que a mediados de la presente década se tendrá el siguiente nivel de acumulación de este tipo de residuos:

- > 15,000 Mton de relaves (0.10 a 0.35% Cut eq)
- > 5,000 Mton de ripios (0.10 a 0.30% Cut)
- > 10.000 Mton de botaderos (>0.10% Cut eq)
- > 100 Mton de escorias (>0.5% Cut eq)

Si Chile pudiese recuperar cada año el 1% del Cu total depositado como residuo, podría aumentar su producción vendible con más de un 10% (sobre 0.5 MT Cu f/año). Ello implicará que la MS será un 10% de la MP y el PIB de Chile se aumenta en más de un 1%.

El expositor es un firme promotor de la MS, llegando a crear, hace algo más de 12 años, un instituto denominado Centro de Investigación en Minería Sustentable (CIMS-JRI) que tiene como foco principal el desarrollo de la MS.

Adicionalmente, hace 5-6 años atrás, en asociación con Ecometales (estatal-independiente), formamos la Asociación JRI-Ecometales, para postular y obtener un aporte de CORFO de 1.000 M\$ para analizar como recuperar especies valiosas desde depósitos de relaves, con énfasis en los metales no usuales (Co, TTRR). En la actualidad, hemos avanzado en un desarrollo tecnológico que denominamos **Relaves de Valor**, con el cual esperamos apoyar a la industria minera en el retratamiento de residuos.

INTRODUCCIÓN (3 de 3)

En ese contexto, el expositor ha preparado esta presentación donde se resumen los aspectos esenciales que se deben tener en cuenta para cuantificar apropiadamente y con alto grado de confianza el material valioso acumulado en un depósito de relaves.

Esta presentación es un aporte para que los actuales y futuros QP que la Comisión Minera registra, tengan una guía ya avanzada en la evaluación de estos recursos mineros artificiales o de **MS**.

A juicio de este expositor, una cuantificación confiable de un depósito de relaves ya colmatado o abandonado, puede ser considerado como un stock de minerales de baja ley y eventualmente podría ser valorizado en forma contable y/o negociado con un tercero que lo procese.

EXPERIENCIA ACUMULADA

JRI tiene casi 40 años de experiencia y el CIMS-JRI, ha cumplido 11 años de vida, ambas trabajando en un 90% para la minería nacional, dentro de las cuales ha podido cuantificar las especies valiosas de los siguientes depósitos de relaves.

- Zona Norte de Tranque Talabre, DCH (>200 Mton@0.30% Cut eq)
- Tranque N°4, CME (< 10 Mton@>1 gr Au/t)
- Relaves de CAP y la franja periférica del Norte Chico (información reservada)

En especial, se debe destacar el esfuerzo de certificar los recursos del Sector Norte de Talabre, donde se efectuaron 24 perforaciones de hasta 40 m en un “tranque vivo”, y los análisis geometalúrgicos y geoestadísticos fueron validados por el especialista geometalurgista senior de Codelco, Sr. Pedro Carrasco (q.e.p.d.).

Adicionalmente, en conjunto con el Profesor R. Fuentes (PhD), lamentablemente fallecido hace 2 meses, también evaluamos modelos que explican el fenómeno de “sorting”, o disgregado de partículas, que tiene impacto en la distribución por peso de partículas y por ende de especies valiosas para 2 grandes depósitos en Chile (Talabre y Carén).

Finalmente, a través de la asociación JRI-Ecometales, con el apoyo de CORFO, establecimos procedimientos públicos simplificados para cuantificar las especies de valor que tienen los relaves en Chile. Ya se han emitido dos manuales de uso público, para explicar cómo cuantificar y procesar los relaves que tienen especies valiosas a nivel comercial.

ASPECTOS GENERALES SOBRE DEPÓSITOS DE RELAVES (1 de 2)

Los relaves constituyen un residuo masivo, que corresponde al 96-98% de todo el mineral extraído y procesado por molienda y separación física (flotación, granulometría, magnetismo).

A mediados del siglo pasado, cuando las leyes de cabeza en los minerales de cobre eran en promedio muy superiores a 1% Cut, la masa de relaves era el 95% del mineral a planta. Hoy, con leyes medias nacionales cercanas al 0.6%, la masa promedio de relaves que se deposita es cercana a 98%.

Si la empresa minera fue ordenada en su gestión, y llevó registros adecuados de su producción de relaves, se podría definir que el depósito de relaves tiene un tonelaje total acumulado con una baja desviación ($\pm 2\%$) y una ley media histórica también conocida ($\pm 3\%$ relativa). Con esta información uno podría decir que no se necesitan análisis geoestadísticos para cuantificar un depósito. Sin desmedro de ello:

- El relave normalmente fue clasificado por tamaño (arenas para muros y lamas para cubeta) lo que distribuye por peso y ley.
- Aunque el relave no haya sido clasificado, la segregación al interior del depósito, por tamaño y peso (sorting), provoca que las especies valiosas se concentran en diversos sectores del depósito (cerca de los puntos de descarga de esas pulpas de relaves).
- Las leyes de las colas de flotación, en especial los subproductos, que fueron registrados por los balances metalúrgicos, normalmente no son confiables (en Operación siempre se “cocinan” los datos para que no hayan retos).

ASPECTOS GENERALES SOBRE DEPÓSITOS DE RELAVES (2 de 2)

- Algunas de las especies son solubles y con el tiempo, se disuelven en el agua remanente y/o con las aguas de lluvia o deshielo (en especial en los muros de arena de la Zona Central).
- Las operaciones eventuales, como las limpiezas de piso, cortes de energía, huelgas y otros, descargan relaves en directo, con leyes cercanos a la ley de cabeza, que no son cuantificados en los balances (p.e. Talabre, tiene sectores con leyes superiores de 0.5%).
- Muchos subproductos (en especial Mo) no son extraídos desde el inicio de la operación de la MP y los relaves de esa época contienen mayor cantidad de dichos subproductos.
- Las operaciones mineras privilegian iniciar la operación con la zona alta ley del yacimiento primario, ello implica que los relaves de los primeros años son casi siempre de mucho mayor ley que el relave final, correspondiente a periodos después de agotada las altas leyes.

Por lo tanto, los antecedentes históricos metalúrgicos sólo constituyen valores referenciales u ordenes de magnitud, y para poder evaluar la magnitud y localización de las especies valiosas es imprescindible realizar una prospección adecuada, más una evaluación de recursos y reservas **bastante diferente de la evaluación del mineral primario.**

SEGREGACIÓN DE ESPECIES VALIOSAS EN EL DEPÓSITO (1 de 2)

En la actualidad, los depósitos de relaves pueden ser de 3 tipos:

- Tranques de relaves con muros de arena (o tortas)
- Depósitos de relaves con muros de empréstito
- Depósitos de alta concentración (pastas)

Las especies valiosas se distribuyen en forma distinta, según el método constructivo del depósito:

- En el caso de los tranques con muros de arena se debe considerar los siguientes fenómenos:
 - ✓ Las arenas (85% + 200#) se distribuyen en forma homogénea por capas inclinadas. Ver Figura 1.  Las arenas contienen el sulfuro no liberados y/o partículas que no flotaron por ser muy pesadas. Las arenas depositadas tienen bajo nivel de segregación y la ley media por capa tiende a ser decreciente con la altura del muro.
 - ✓ El material depositado en la cubeta lo constituyen los relaves en directo y las lamas de clasificación por ciclones (90%-200#). Ellos se depositan por diversos lugares de la cubeta del tranque. Ver Figuras 2 y 3.  La pulpa a depositar, dada su baja concentración en peso, presenta segregaciones muy fuertes y las especies valiosas se concentran en la cercanía de los puntos de descarga (las especies valiosas se “hunden”).



FIGURA 2 – DISTRIBUCIÓN DE RELAVES/LAMAS EN CUBETA

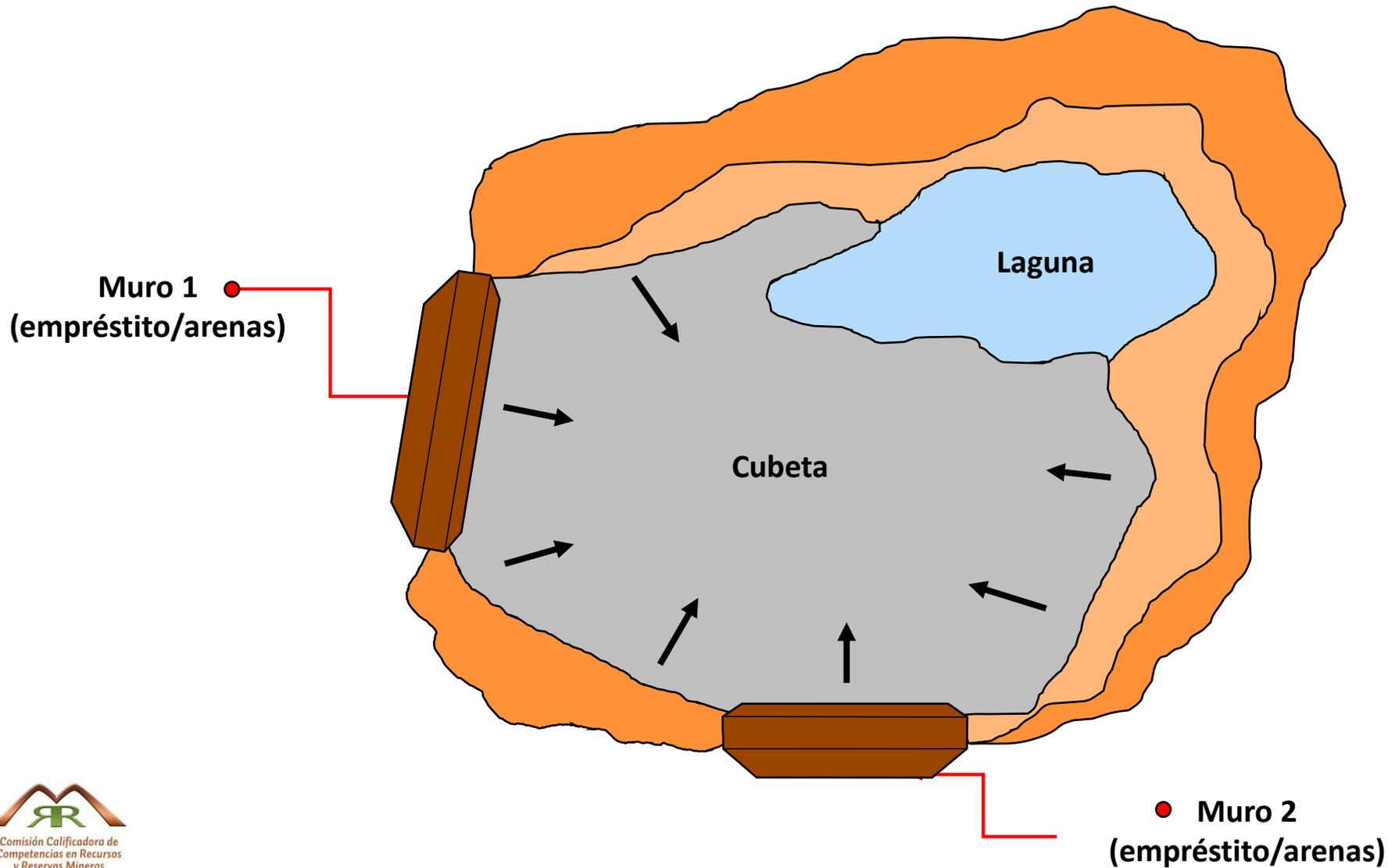
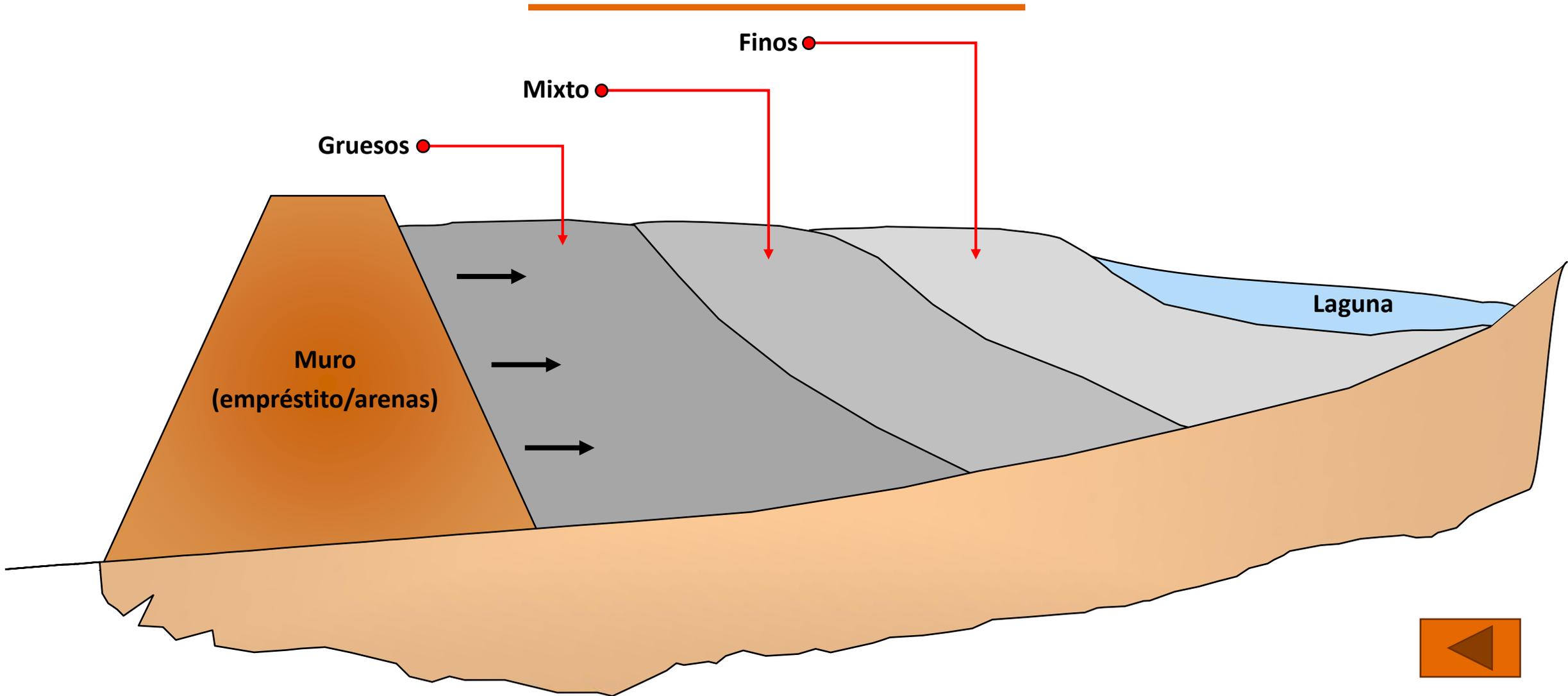


FIGURA 3 – SEGREGACIÓN Y SEPARACIÓN POR TAMAÑO (Y LEY)



SEGREGACIÓN DE ESPECIES VALIOSAS EN EL DEPÓSITO (2 de 2)

- En el caso de los embales con muros de empréstito la depositación del relave al interior de la cubeta no tiene tanta segregación como el caso de los relaves con lamas (menores concentraciones de la pulpa), pero por fenómeno de sorting también existe y es relevante. (Ver Figuras 2 y 3 antes indicadas).
- En el caso de los relaves en pasta, con concentraciones de pulpa normalmente superiores al 65-67% en peso, la segregación es mínima y el relave tendrá una distribución bastante pareja. Ver Figura 4. 

Cabe destacar que en todos los depósitos de relaves la densidad in situ del relave depositado crece con la profundidad, ello por el efecto de presión creciente de las capas de material que se depositan una sobre otras. Esta presión provoca un estruje y acomodación de partículas, el agua excedente fluye hacia superficie donde se evapora.

Es así como las capas inferiores pueden recibir presiones equivalentes a 20 atmosferas para depósitos de algo más de 100 metros de altura, lo que implica un fuerte estruje del agua intersticial y compactación forzada del mineral. Ver Figura N°5. 

FIGURA 4 – DEPÓSITO DE PASTAS (ALTA CONCENTRACIÓN)

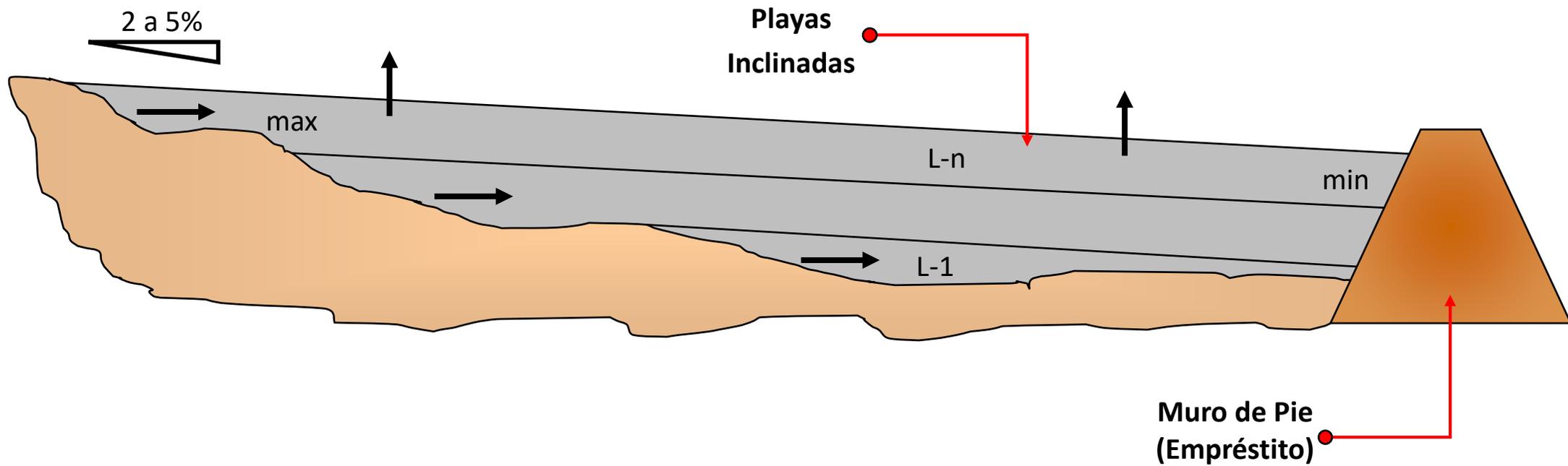
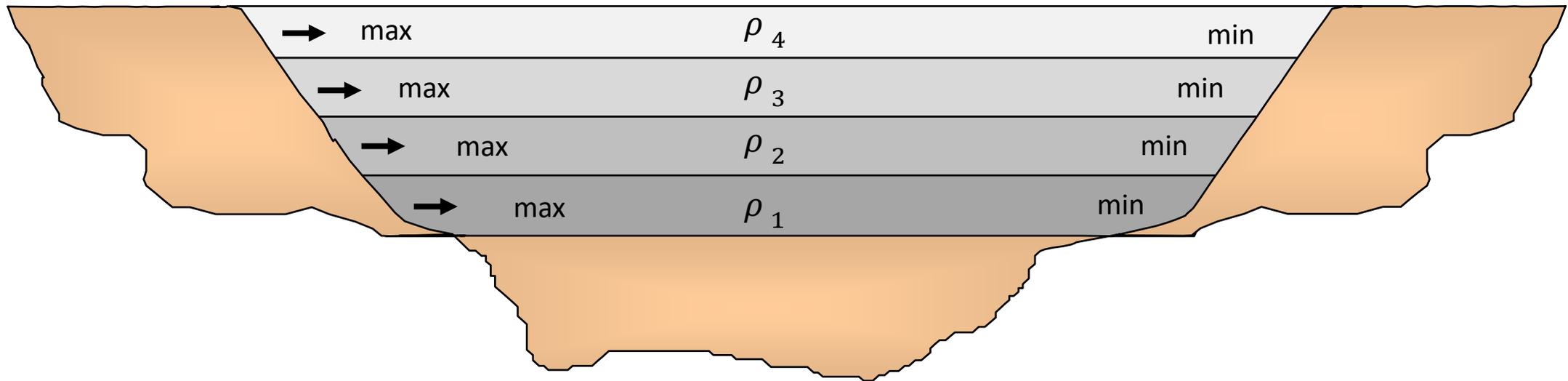


FIGURA 5 – DENSIDAD VS ALTURA

Densidad in situ: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ $\left[\frac{t_s}{m^3} \right]$
(ton seca(/m3))



METODOLOGÍA DE PROSPECCIÓN EN UN DEPÓSITO DE RELAVES

Los depósitos de relaves pueden ser prospectados por diversos métodos (ver Manual de Uso Público – 16PTCME-665527 de CORFO – JRI - ECOMETALES).

A juicio del expositor, las técnicas de prospección más recomendables son:

- Depósitos de baja altura (<20 m) y consolidados.
 - ✓ Perforadora manual de tubo (sólo pocos metros de alcance)
 - ✓ Calicatas mediante retroescavadora o calicatas y entibaciones (puede ser 100% manual).
 - ✓ Perforadora helicoidal (remoción continua para construir pozos de agua).
 - ✓ Perforadora de percusión (típica de geotecnia).

- Depósito de gran altura (>30 m)
 - ✓ Perforadora de percusión (<100 m)
 - ✓ Perforación de diamantina
 - ✓ Sondaje CPT-FRX (con rayos X)

En grandes depósitos de relaves, la opción más conveniente es mezclar sondajes de percusión con sondajes de rayos X, de modo de tomar muestras con las primeras y calibrar los datos de las segundas, se debe perforar algunos pares de pozos muy cercanos con ambas tecnologías.

ATRIBUTOS EN MODELO DE BLOQUES EN DEPÓSITOS DE RELAVES

Los modelos de bloques para la cuantificación de especies valiosas en depósitos de relaves deben tener las siguientes características y atributos.

- Orientación no cartesiana (pueden tener el eje Z inclinado en muros de arena y depósitos en pasta).
- Forma del bloque, habitualmente son de baja altura y gran superficie (p.e. 1x10x10).
- Porcentaje del bloque con relave (los bloques del perímetro pueden contener aire, empréstito o terreno natural).
- Densidad del sólido seco (ton sólido seco/m³ relave), se calcula por modelamiento global a partir de data geotécnica.
- Geometalurgia (granulometrías, % + 65#, %+200#, %-200# y leyes por tamaño).
- Contenido de humedad (5 a 35% de agua/ton relave seco) permite cuantificar el agua disponible.
- Leyes adicionales de Cus, Mo, Au, Fe magnético y eventualmente P y TTRR (otros?).
- Leyes de especies ligadas a materiales valiosos escasos (p.e. P vs TTRR/Au vs Py). Se define por análisis geometalúrgicos previos de laboratorio.

CARACTERÍSTICAS DEL PLAN MINERO

El plan minero de la **MS** debe tener condiciones que lo hacen diferente de los planes de **MP**:

- Normalmente las mejores leyes de un depósito están en profundidad. Ello implica que la producción de especies valiosas, será creciente hasta alcanzar las zonas enriquecidas y luego volverá a decrecer.
- La remoción debe realizarse evitando que exista riesgo de estabilidad del depósito durante el proceso.
 - ✓ No remover muros resistentes que podrían provocar colapso del depósito, en caso de fluidización del material fino saturado causado por un sismo de gran intensidad.
 - ✓ Siempre considerar cubeta remanente para almacenar el agua producto de grandes tormentas, evitando un daño ecológico por descarga de aguas con relaves al cauce natural.
- El tipo de equipamiento a usar depende de la humedad remanente del depósito:
 - ✓ Si el depósito es seco, o semi-seco, se puede usar técnicas de remoción tipo cargador y camión; o rotopala con correas transportadoras.
 - ✓ Si el depósito es húmedo con pocas partes saturadas, se puede utilizar pitoneo hidráulico cuidando de no afectar la estabilidad de los bancos y la seguridad de los operadores.
 - ✓ Si el depósito tiene mayoritariamente zonas saturadas, la única opción es el dragado con apoyo de pitoneo.

El costo de remoción seca o húmeda es normalmente del orden de 1 a 2 US\$/Ton de relaves removido.

ANÁLISIS DE RESERVAS

- El volumen total del relave debe ser calculado por topografía original del terreno donde está el depósito, asumiendo pequeñas desviaciones (compresión del terreno original por el peso del relave depositado).
- La experiencia indica que si se definen bloques con orientaciones según la fase de depósito, los atributos de diferentes leyes obtenidas para los modelos de bloques permiten calcular variogramas diferentes según orientación (con fuerte influencia de la altura y menor influencia de la lejanía al punto de descarga). Ello implica que pesa más el momento histórico del depósito que la localización interna.
- Las leyes de corte deben considerar un costo de remoción y reprocesamiento mucho más bajo, 3 a 6 veces menos que la **MP** (no hay tronadura, ni desarrollo, no hay chancado ni molienda primaria, etc.) y las recuperaciones deben estar basada en buenos estudios experimentales, incluso pilotajes en casa. Es habitual tener leyes de corte entre 0.05% y 0.10% Cut
- Normalmente es posible conseguir correlaciones entre granulometría y algunas leyes, correlaciones geometalúrgicas de asociatividad de especies (Au con Py, TTRR con P y arcillas, etc.), que permiten afinar la cuantificación y localización de las especies valiosas.
- La cuantificación de la humedad es relevante para determinar el aporte de agua que tiene el relave para el proceso posterior, el cual es varias veces superior al caso del mineral in situ. Por ello la remoción y el retratamiento de relaves tiene un make up relativamente bajo.

EN RESUMEN

- Cuantificar adecuadamente y en forma confiable depósitos de relaves es una necesidad imperiosa para nuestro país.
- Un depósito de relaves puede dejar de ser un pasivo ambiental y se podría constituir en un activo potencial y económico de cualquier empresa minera. Para explotación propia o por acuerdos con terceros.
- Para lograr una cuantificación satisfactoria es necesario considerar la naturaleza de los depósitos a evaluar (forma de depositar, sorting, densidad, variabilidad, etc.) y las mejores técnicas de remoción, reprocesamiento y re-depósito (de modo de tener una ley de corte muy baja).

PARA TERMINAR

El suscrito, en nombre de la asociación JRI-ECOMETALES, de JRI y CIMS-JRI, agradece a la Comisión la oportunidad de haber podido exponer su visión y experiencia en la cuantificación de especies valiosas desde relaves.

Creemos conveniente que la Comisión defina oportunamente pautas formales de evaluación de reserva desde depósitos de relaves. La Minería Secundaria será una realidad en el corto o mediano plazo.



TALLER DE ANÁLISIS

CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES VALIOSAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES – ASPECTOS ESENCIALES A CONSIDERAR

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

JUAN RAYO P. – DIRECTOR
JRI INGENIERÍA S.A.

12 MAYO 2021