

Avances Programa I+D RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS DE VALOR DESDE RELAVES



Proyecto apoyado por

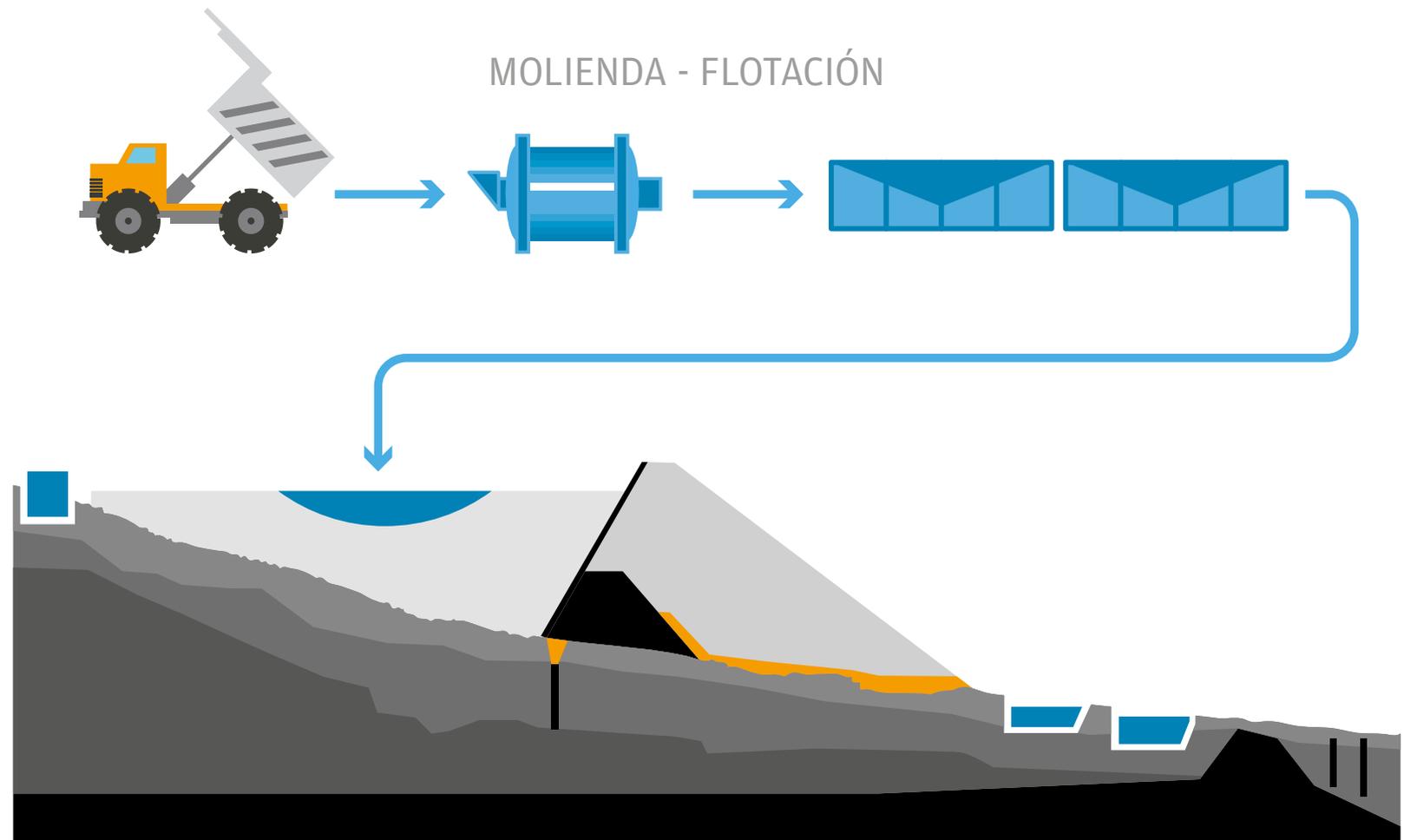


De la mina al tranque: Los cambios químicos

Procesos que modifican las características químicas de un depósito de relaves:

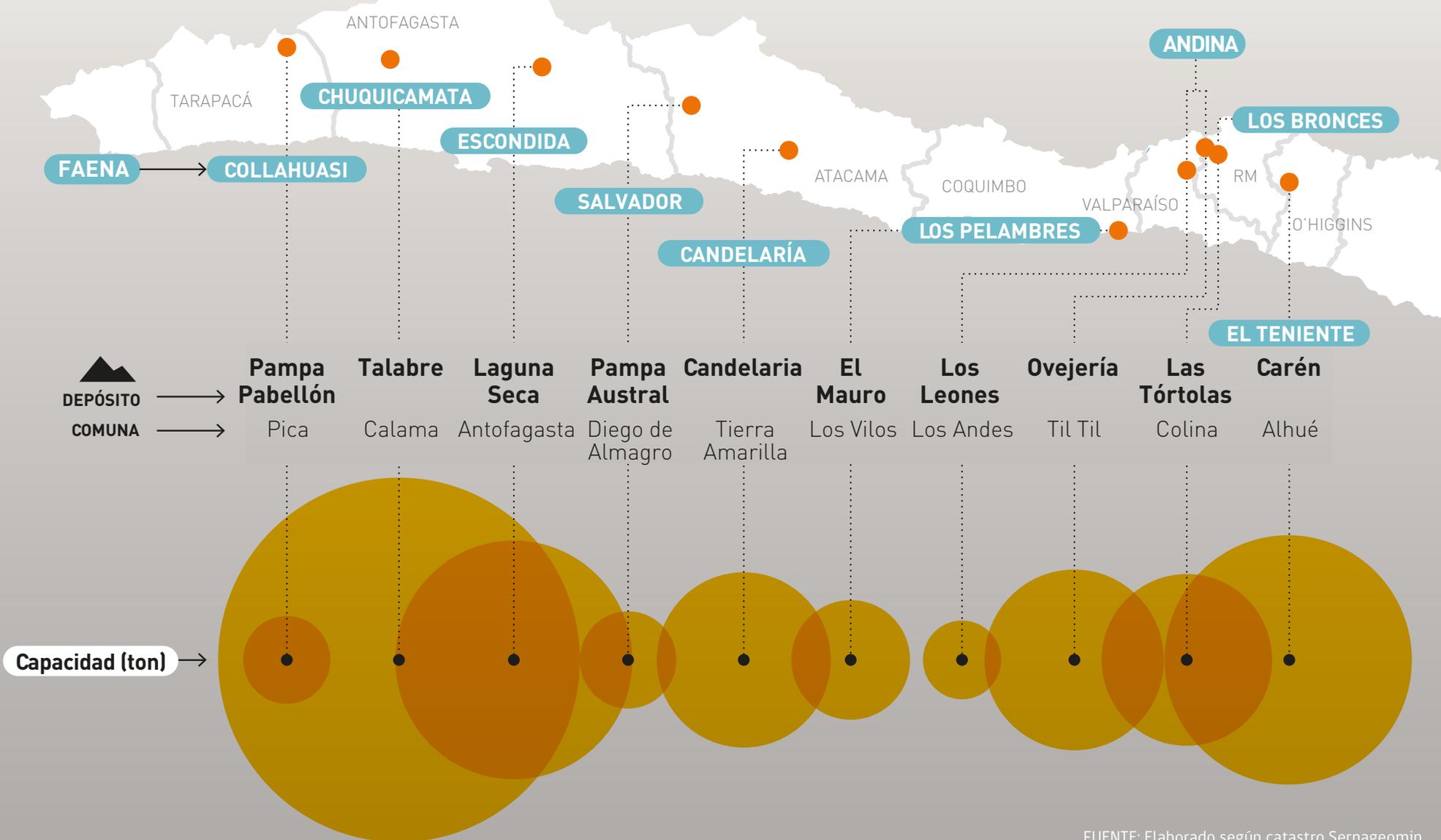
- Migración de elementos químicos en el cuerpo del relave
- Contaminación de aguas (superficiales e infiltradas)

Unidades Geometalúrgicas (UGM)



RELAVES TOP 10

Representan el **90%** del tonelaje total de los 740 tranques catastrados por Sernageomin. Suman **6.600 millones** de toneladas, las que aumentan a razón de un **10% anual**.



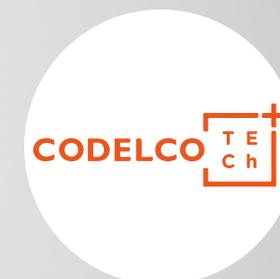
FUENTE: Elaborado según catastro Sernageomin.

INICIATIVAS PÚBLICO PRIVADAS ASOCIADAS A RELAVES

Programa Tecnológico de
Monitoreo en Línea de Depósitos
de Relaves.



Programa identificación,
cuantificación y extracción
(bio) tecnológica de minerales/
elementos de valor contenidos
en depósitos de relaves.

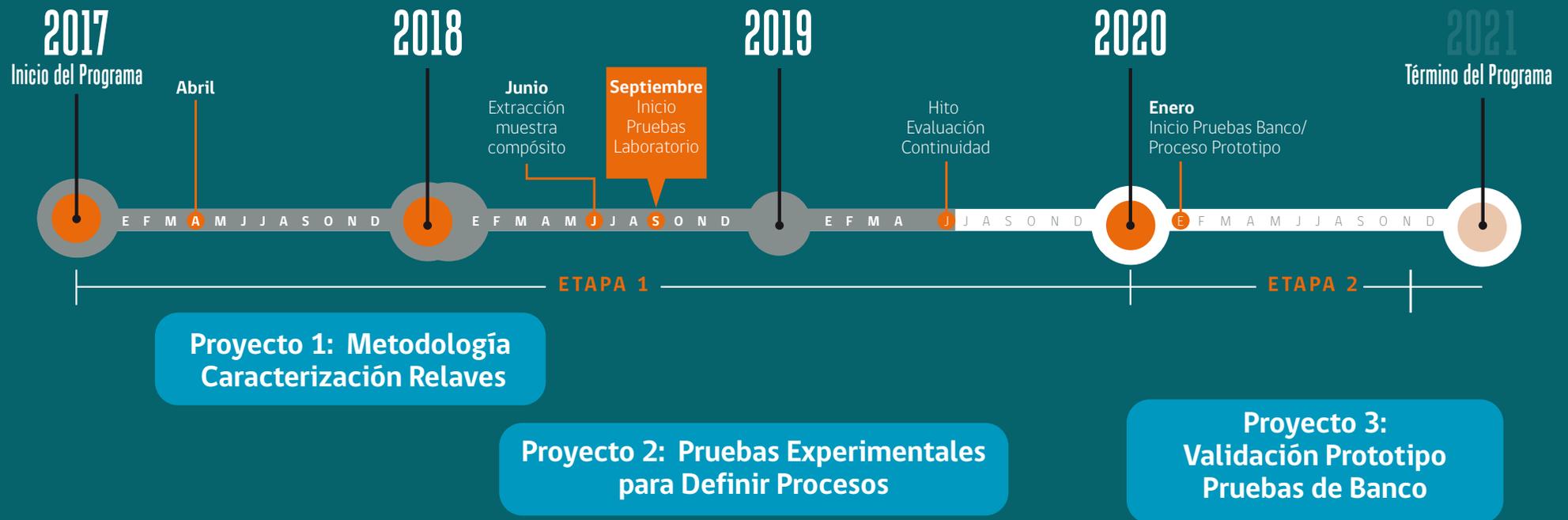


Programa I+D para
la recuperación de
elementos de valor
desde relaves.



CONSORCIO JRI Ingeniería & EcoMetales Limited

PROGRAMA I+D PARA LA RECUPERACIÓN DE ELEMENTOS DE VALOR DESDE RELAVES



Proyecto 1: GENERAR UNA METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RELAVES



Énfasis:

Conocer cuales minerales (fáciles de reconocer) están asociados a los principales elementos estratégicos y de valor (rentables de recuperar).

Determinar que tecnologías presentes en el mercado son las más apropiadas para medir elementos y caracterizar relaves.

Proponer una metodología para buscar elementos de valor y caracterizar representativamente los depósitos de relaves.

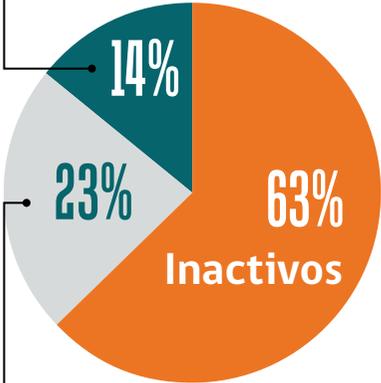


Producto final del proyecto:

Guía de evaluación de tranques, énfasis en elementos estratégicos de valor.

ZONA DE INTERÉS PARA EL ESTUDIO

Activos



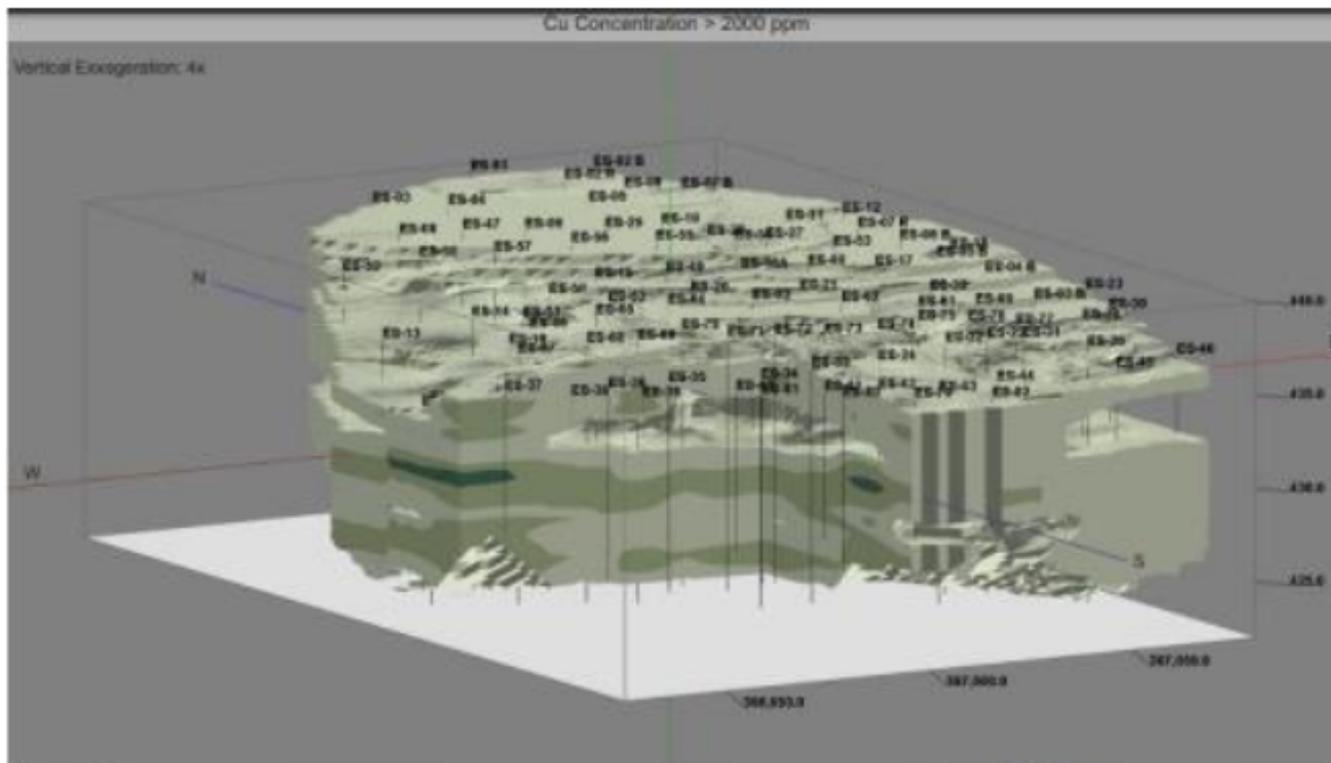
Abandonados



¿DÓNDE?

FRANJA FERRÍFERA: formación geológica que caracteriza a las regiones de Atacama y Coquimbo por sus altos contenidos de fierro, que se asocia a la presencia de Tierras Raras (REE).

Proyecto 1: AVANCES Y RESULTADOS

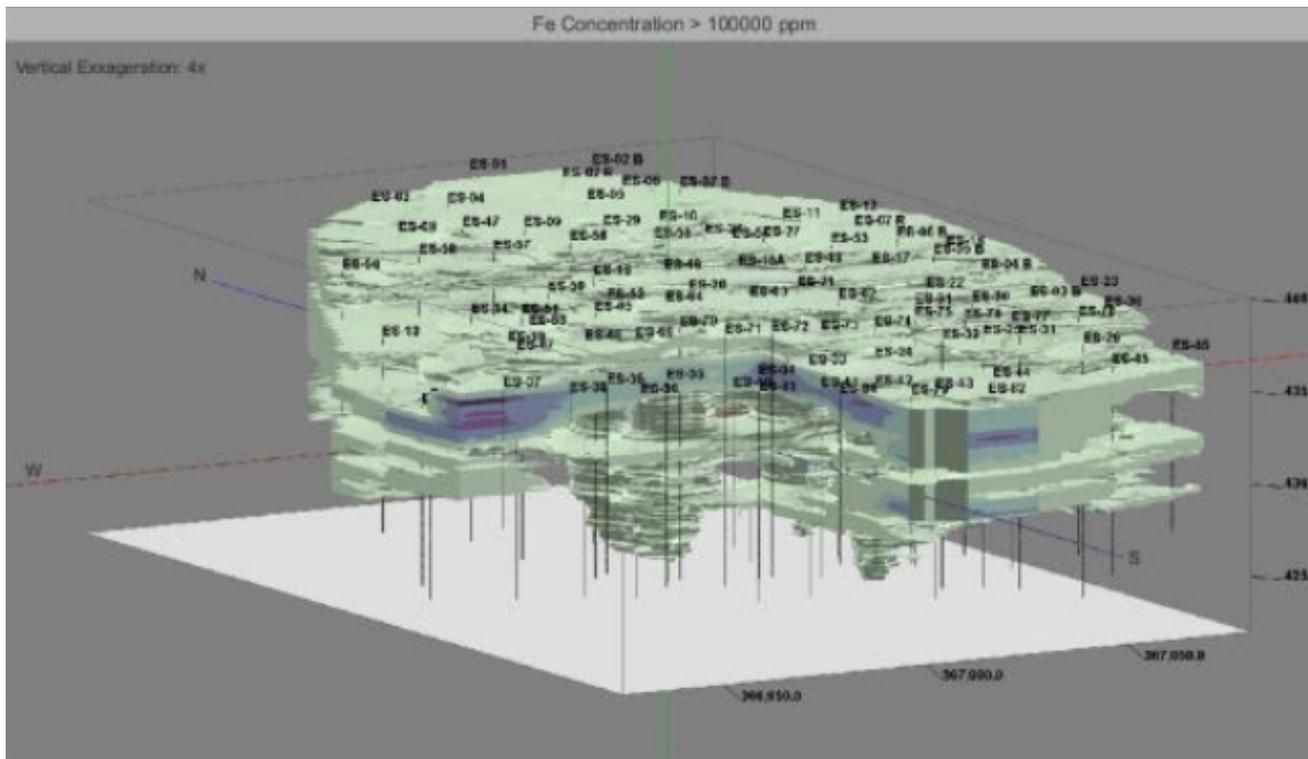


La técnica de perforación CPT-FRX (Fugro) permite la perforación del relave, toma de muestras (Denken) y análisis en línea de elementos mayores como Cu, Fe, Pb, Zn y As.

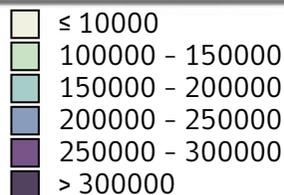
Además, permite la distribución espacial de los elementos mencionados.

Modelo de distribución 3D de Cu.

Proyecto 1: AVANCES Y RESULTADOS



Concentración de Fe
(ppm)



Modelo de distribución 3D de Fe. Se puede observar que las zonas el alta ley de Fe (40% aprox.) se encuentran en el centro del relave.

Conclusión:

La técnica CPT-FRX es útil como herramienta exploratoria, a pesar de que es necesario contar con los análisis químicos para calibrar el equipo.

Permite la visualización de zonas de alta ley.

¿EN QUÉ SE UTILIZAN?

REE - RARE EARTH ELEMENTS

TABLA PERIÓDICA

FÓSFOROS:
Pantallas CRT, LPD,
LCD, Lámparas
Fluorescentes,
Láseres, Fibra
Óptica

CERÁMICAS:
Condensadores,
Sensores,
Colorantes, Láseres,
Refractarios.

ALEACIONES:
Baterías NiMH,
Pilas Combustibles,
Piedras
Encendedores,
Súper Aleaciones
Al-Mg

CATALIZADORES:
Refino de Petróleo,
Convertidores
Catalíticos,
Aditivos del Diésel,
Análisis Químicos

IMANES:
Motores Híbridos,
Discos Duros,
Turbinas Eólicas,
Micrófonos
Altavoces

VIDRIO/ÓPTICA:
Pulidores, Cristales
con Protección UV,
Imágenes R

OTROS:
Nuclear
Defensa

■ Platinoides ■ Tierras raras livianas ■ Tierras raras pesadas ■ Otros elementos

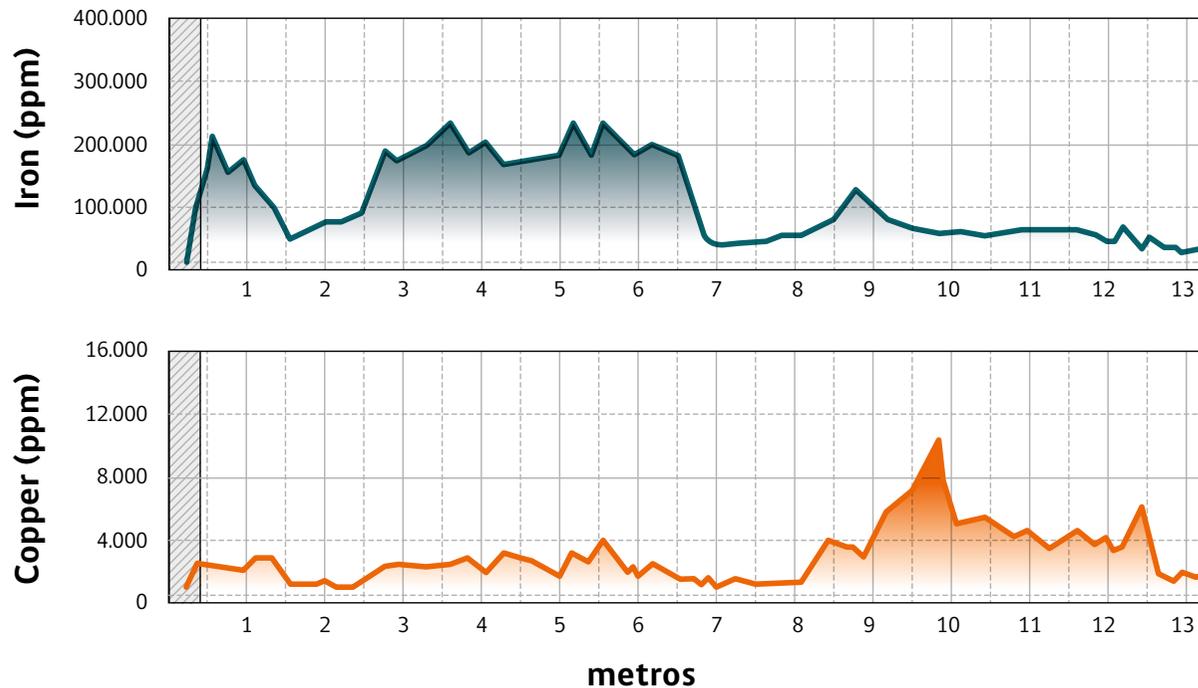
1 1.008 H HIDRÓGENO	2 4.0026 He HELIO																
3 6.94 Li LITIO	4 9.0122 Be BERILIO											5 10.81 B BORO	6 12.011 C CARBONO	7 14.007 N NITRÓGENO	8 15.999 O OXÍGENO	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NEÓN
11 22.990 Na SODIO	12 24.305 Mg MAGNESIO											13 26.982 Al ALUMINIO	14 28.085 Si SILICIO	15 30.974 P FÓSFORO	16 32.06 S AZUFRE	17 35.45 Cl CLORO	18 39.948 Ar ARGÓN
19 39.098 K POTASIO	20 40.078 Ca CALCIO	21 44.956 Sc ESCANDIO	22 47.867 Ti TITANIO	23 50.942 V VANADIO	24 51.996 Cr CROMO	25 54.938 Mn MANGANESO	26 55.845 Fe HIERRO	27 58.933 Co COBALTO	28 58.693 Ni NIQUEL	29 63.546 Cu COBRE	30 65.38 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALIO	32 72.64 Ge GERMANIO	33 74.922 As ARSENICO	34 78.971 Se SELENIO	35 79.904 Br BROMO	36 83.798 Kr KRIPTÓN
37 85.468 Rb RUBIDIO	38 87.62 Sr ESTRONCIO	39 88.906 Y ITRIO	40 91.224 Zr CIRCONIO	41 92.906 Nb NIOBIO	42 95.95 Mo MOLIBDENO	43 (98) Tc TECNECIO	44 101.07 Ru RUTENIO	45 102.91 Rh RODIO	46 106.42 Pd PALADIO	47 107.87 Ag PLATA	48 112.41 Cd CADMIO	49 114.82 In INDIO	50 118.71 Sn ESTAÑO	51 121.76 Sb ANTIMONIO	52 127.60 Te TELURIO	53 126.90 I YODO	54 131.29 Xe XENÓN
55 132.91 Cs CESIO	56 137.33 Ba BARIO	57-71 La-Lu Lantánidos	72 178.49 Hf HAFNIO	73 180.95 Ta TANTALO	74 183.84 W WOLFRAMO	75 186.21 Re RENIUM	76 190.23 Os OSMIO	77 192.22 Ir IRIDIO	78 195.08 Pt PLATINO	79 196.97 Au ORO	80 200.59 Hg MERCURIO	81 204.38 Tl TALIO	82 207.2 Pb PLOMO	83 208.98 Bi BISMUTO	84 (209) Po POLONIO	85 (210) At ASTATO	86 (222) Rn RADÓN
87 (223) Fr FRANCIO	88 (226) Ra RADIO	89-103 Ac-Lr Actínidos	104 (267) Rf RUTHERFORDIO	105 (268) Db DUBNIO	106 (271) Sg SEABORGIO	107 (272) Bh BOHRIO	108 (277) Hs HASIO	109 (276) Mt MEITNERIO	110 (281) Ds DARMSTADTIO	111 (280) Rg ROENTGENIO	112 (285) Cn COPERNICIO	113 (285) Nh NIHONIO	114 (287) Fl FLEROVIO	115 (289) Mc MOSCOWIO	116 (291) Lv LIVERMORIO	117 (294) Ts TENESIO	118 (294) Og OGANESÓN
LANTÁNIDOS																	
57 138.91 La LANTANO	58 140.12 Ce CERIO	59 140.91 Pr PRASEODIMIO	60 144.24 Nd NEODIMIO	61 (145) Pm PROMETIO	62 150.36 Sm SAMARIO	63 151.96 Eu EUROPIO	64 157.25 Gd GADOLINIO	65 158.93 Tb TERBIO	66 162.50 Dy DISPROSIO	67 164.93 Ho HOLMIO	68 167.26 Er ERBIO	69 168.93 Tm TULIO	70 173.05 Yb ITERBIO	71 174.97 Lu LUTECIO			
ACTÍNIDOS																	
89 (227) Ac ACTINIO	90 232.04 Th TORIO	91 231.04 Pa PROTACTINIO	92 238.03 U URANIO	93 (237) Np NEPTUNIO	94 (244) Pu PLUTONIO	95 (243) Am AMERICIO	96 (247) Cm CURCIO	97 (247) Bk BERKELIO	98 (251) Cf CALIFORNIO	99 (252) Es EINSTEINIO	100 (257) Fm FERMIO	101 (258) Md MENDELEVIO	102 (259) No NOBELIO	103 (262) Lr LAWRENCIO			

Copyright © 2017 Eni Generali

Proyecto 1: ASOCIACIÓN DE ELEMENTOS DE MAYOR CONCENTRACION CON ELEMENTOS TRAZA

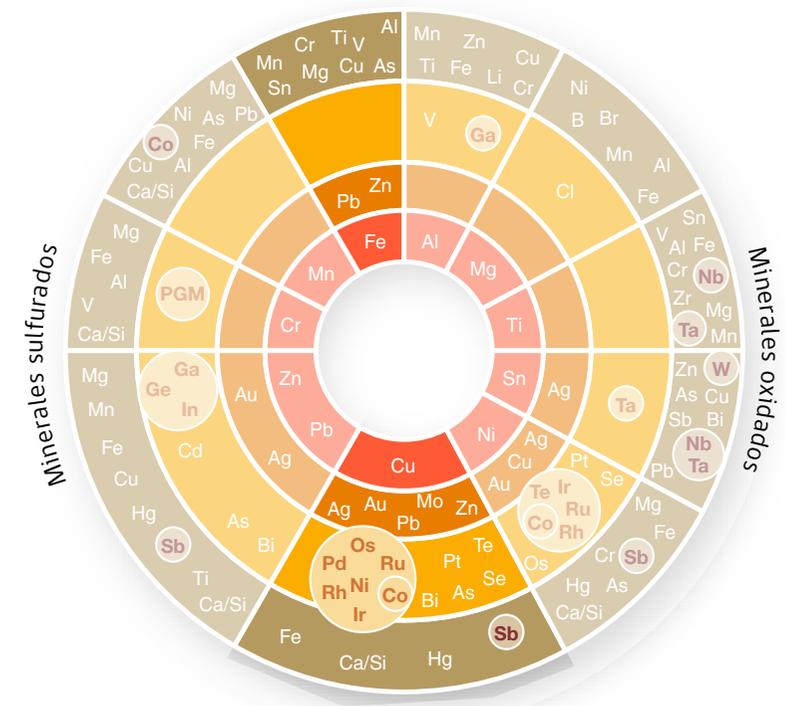
Toma de muestra, análisis químico y mineralógico.

- **Tecnología FRX, Fugro:** Se observa una alta presencia de Fe y Cu.
- **Rueda del Metal:** Alta probabilidad de ocurrencia de tierras raras y otros metales de alto valor.



RUEDA DE REUTER

- Metal principal
- Infraestructura limitada
- Sin infraestructura (residuos)



Proyecto 2: IDENTIFICAR PROCESOS QUE PERMITAN RECUPERAR VALOR



Énfasis:

Definir y validar un esquema tecnológico para la recuperación de elementos de valor desde relaves.

Que dicho esquema defina un producto comercial, que sea viable técnica y económicamente y considere la disposición final de los residuos generados.

Hacer recomendaciones técnicas para un marco regulatorio ad hoc.



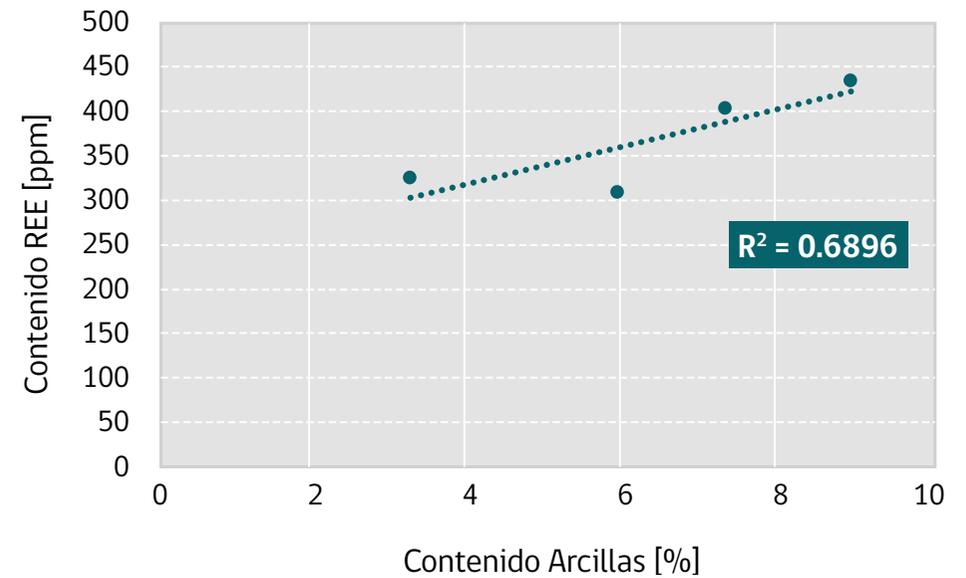
Producto final del proyecto:

Proceso tecnológico definido.

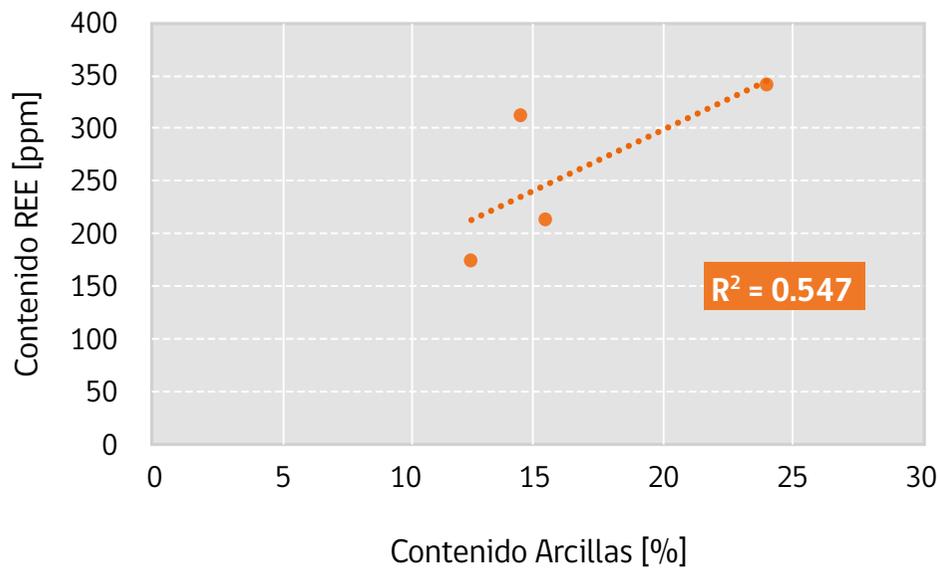
CORRELACIONES REE- ESPECIES MINERALÓGICAS MAYORES



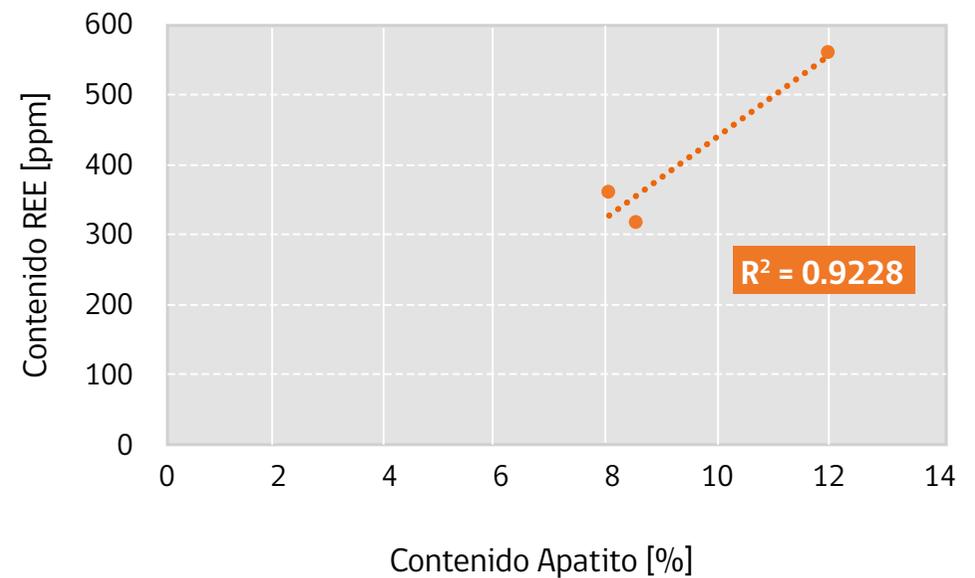
Relave 1 (III Región)



Relave 2 (III Región)



Relave 3 (IV Región)



Proyecto 2: ETAPAS UNO Y DOS

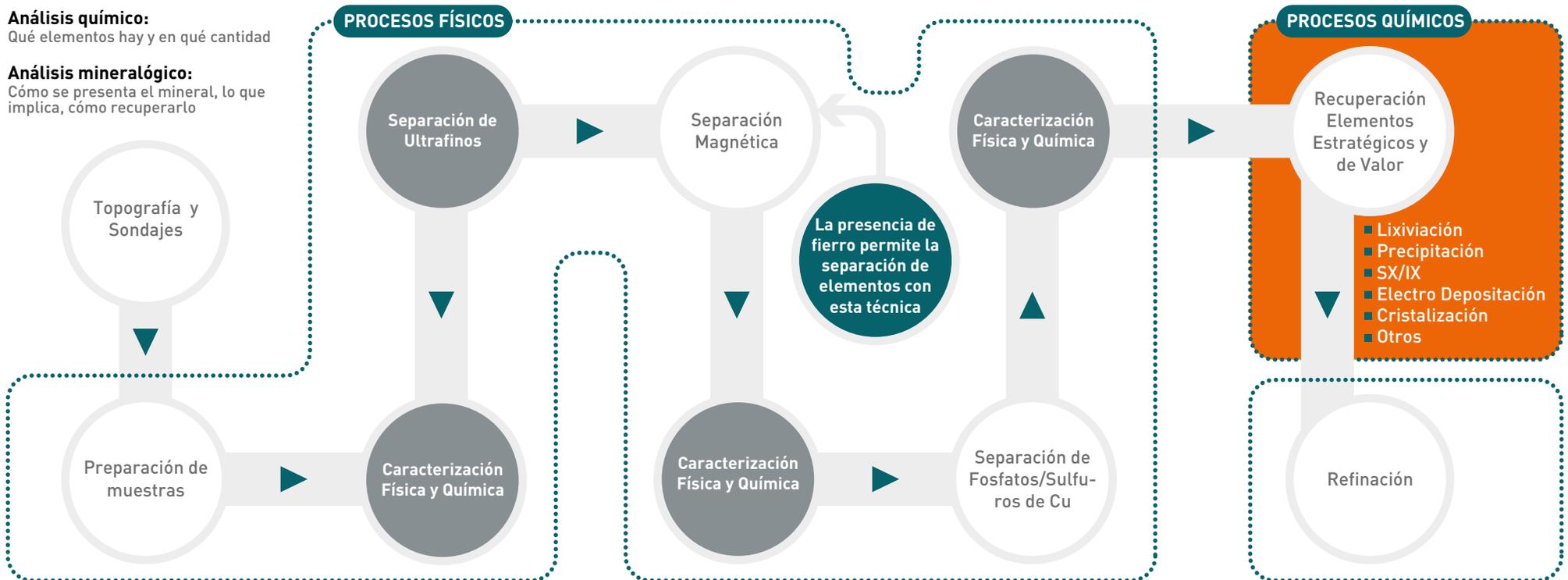
Procesos Físicos y Químicos

Análisis químico:

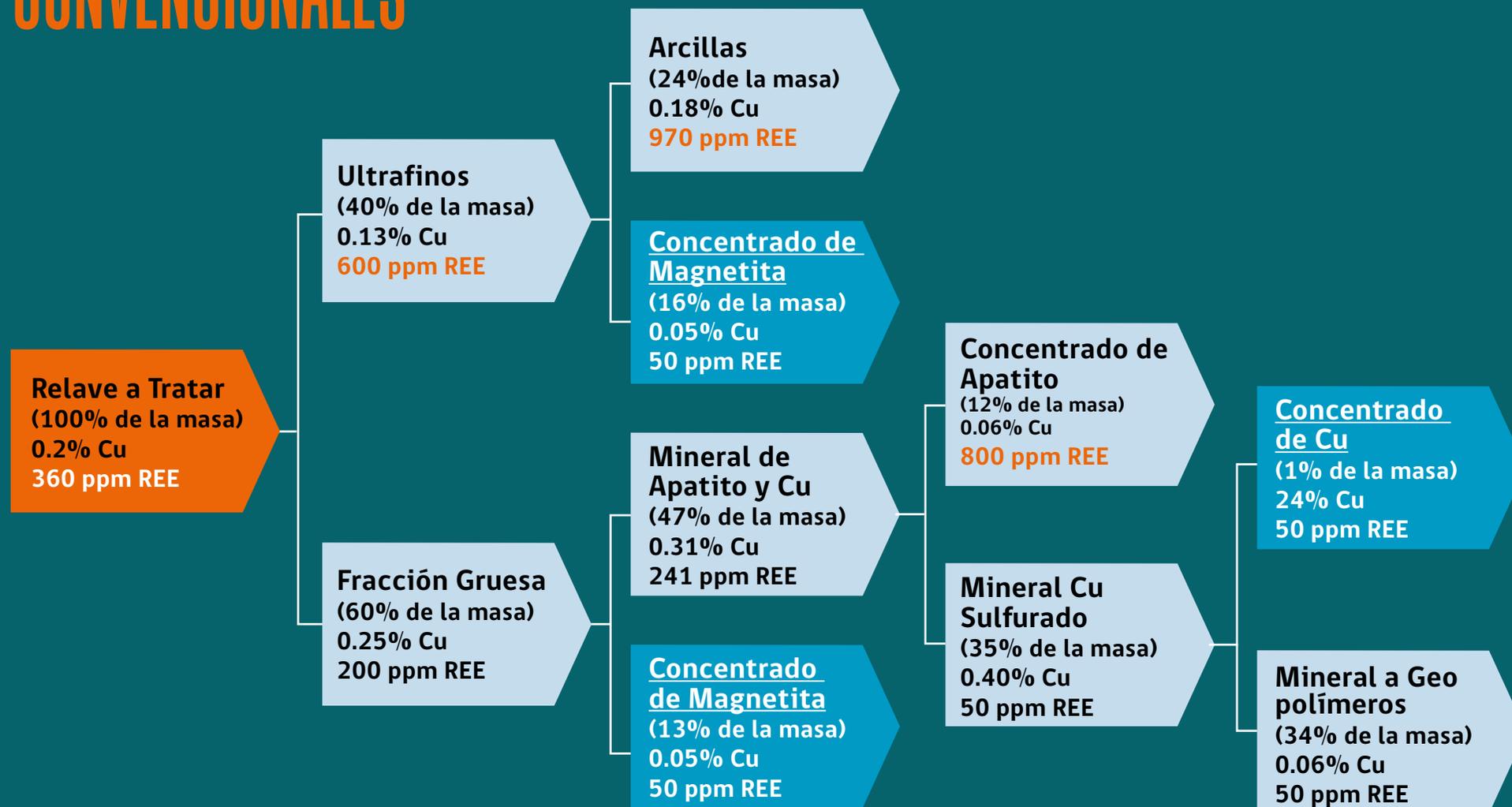
Qué elementos hay y en qué cantidad

Análisis mineralógico:

Cómo se presenta el mineral, lo que implica, cómo recuperarlo



CONCENTRACIÓN DE VALOR CON PROCESOS FÍSICOS CONVENCIONALES



ASPECTOS CLAVES

- 1** Metodología para caracterizar e identificar especies de valor económico en un relave, a partir de minerales abundantes y fáciles de reconocer. **CREADA**

- 2** Secuencia de procesos convencionales que permitan concentrar y recuperar elementos de valor económico. **DEFINIDA**

- 3** Determinar si las inversiones y costos operacionales requeridos son rentables, para qué tamaño de relaves y en qué plazos. **POR DEFINIR**

- 4** Conocer cómo funcionan los mercados de estos elementos de valor económico, "escasos y estratégicos". **POR DEFINIR**



CONSORCIO
JRI Ingeniería &
EcoMetales Limited

WWW.RELAVESCONVALOR.CL

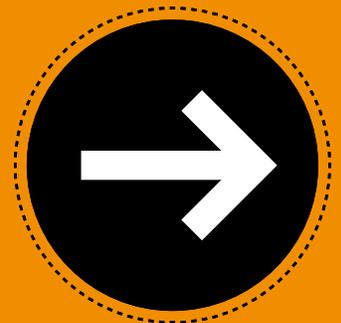


Proyecto apoyado por



INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO / 16PTECME-66527

MANUAL DE USO PÚBLICO



**Técnicas de perforación,
muestreo y caracterización
para la recuperación de elementos
de valor desde relaves**

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	CONCEPTOS Y GENERALIDADES	6
2.1.	DEPÓSITO DE RELAVE	6
3.	MINERALOGIA FRECUENTE EN DEPÓSITOS DE RELAVES.	13
3.1.	ÓXIDOS MAYORES	13
4.	TÉCNICAS DE PERFORACIÓN	19
4.1.	SONDAJE PERCUSIÓN	XX
4.2.	SONDAJE DE AIRE REVERSO	XX
4.3.	SONDAJE DE DIAMANTINA	XX
4.4.	SONDAJE MANUAL	23
4.5.	SONDAJE SÓNICO	23
4.6.	SONDAJE CPT-FRX (FUGRO)	24
4.7.	PERFORACIÓN CON BARRENO (AUGER DRILLING)	XX
4.2.	TÉCNICAS DE MUESTREO	26
5.	OBJETIVO GENERAL	26
5.1.	MUESTREO POR CANALETAS	26
4.2.	MUESTREO PUNTUAL	27
4.3.	MUESTREO EN CANCHAS, RELAVES, PLACERES, DEPÓSITOS DETRÍTICOS O ZANJAS.	28
4.4.	MUESTREO POR POZOS	28
4.5.	MUESTREO EN PUNTO DE EXTRACCIÓN: MARINAS	29
4.4.	RECOMENDACIONES	29
4.1.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO.	31
4.2.	OBJETIVO GENERAL	31
4.3.	ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA)	31
4.4.	FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)	32
4.5.	ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP-MS)	32
4.5.	ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA (AAN)	33
4.6.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO	34
4.7.	OBJETIVO GENERAL	34
4.3.	MICROSCOPIO DE LUZ POLARIZADA	34
4.4.	DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X (DRX)	35
5.	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE MATERIALES. (QEMSCAN)	35
	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA (NIR)	37
	ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES.	38
	OBJETIVO GENERAL	38
	RELACIÓN ÓXIDOS MAYORES – MINERALOGÍA SILICATOS	38
	CORRELACIÓN ÓXIDOS MAYORES – ELEMENTOS TRAZA	41
	RELACIÓN MINERALOGÍA – ELEMENTOS TRAZA	42
	BIBLIOGRAFÍA	44



Análisis de datos químicos y mineralógicos de los depósitos de relaves.

A continuación se detalla la ocurrencia de minerales y elementos de valor en depósitos de relave y su relación genética con las rocas que los contienen, haciendo uso de las herramientas químicas y mineralógicas.

8.1

RELACIÓN ÓXIDOS MAYORES – MINERALOGÍA SILICATOS

No es frecuente tener disponible la información química y mineralógica del yacimiento madre, al momento de evaluar la potencialidad del relave. Para esa finalidad se utiliza una metodología basada en las asociaciones que existen entre los óxidos mayores y las especies mineralógicas de los depósitos de relaves. Esta información es clave para entender el comportamiento de los minerales dentro del relave, ya que la mayoría de los minerales de ganga (silicatos mayormente), se pueden expresar como compuestos asociados a los óxidos mayores.

Para realizar este análisis es necesario contar con información respecto de las leyes de los óxidos mayores (FRX) y de los elementos traza (ICP) de las muestras obtenidas del tranque. Es necesario también, conocer los minerales encontrados en el depósito de relave, para lo cual se sugieren análisis mineralógicos, específicamente *microscopía tradicional*, DRX o Qemscan.

La metodología utilizada se resume en los siguientes pasos:

1) Recopilación de datos químicos y mineralógicos del depósito

Los minerales reconocidos en el depósito de relave presentan una composición química que se puede expresar mediante la ocurrencia de óxidos mayores.

La **Tabla N°1** muestra un ejemplo de aquellos minerales que pueden contener en su composición química la presencia de Oxido de Aluminio Al_2O_3 :

MINERAL	Al_2O_3 (%)
Minerales de Arcilla	45-60
Sericita/Muscovita	38,36
Alunita	37
Turmalina	29,04
Albita	20
Feldespato Potásico	18
Clorita	17,13
Biotita	11,76
Epidota	7,36
Esfeno	5,16
Anfíbol	2,63

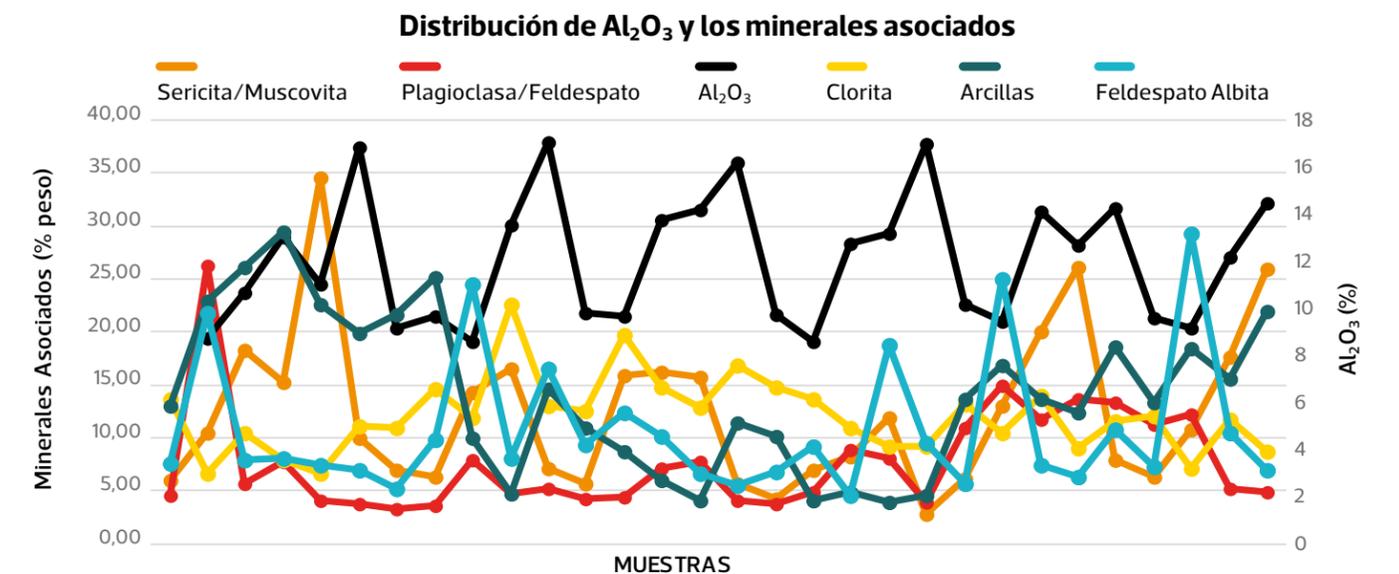
Tabla N° 1: Porcentaje de Al_2O_3 en los minerales identificados mediante QEMSCAN.

Al observar la **Tabla N° 1**, es posible constatar que el óxido mayor Al_2O_3 forma parte de los Minerales Arcillas, Sericita/Muscovita, Alunita, Turmalina, Albita, Feldespato Potásico, Clorita, Biotita, Epidota, Esfeno y Anfíbol.

Los minerales que presentan mayor contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3) son Arcillas y Sericita/Muscovita (*). Así también los que tienen menor contenido de óxido de aluminio son Esfeno y Anfíbol.

2). Análisis de distribución óxido mayor estudiado y sus minerales asociados

La **Figura N° 32**, permite observar la comparación entre los Minerales de Arcilla que presentan el mayor porcentaje de alúmina (Al_2O_3), seguidos de Sericita/Muscovita. (Arcilla o Clays, representado en violeta)



3. Análisis de correlación (R^2)

Para confirmar las relaciones o ligazón entre mineral y óxido mayor, se sugiere analizar la correlación estadística (R^2) entre estos minerales y el óxido mayor, asumiendo como un coeficiente de correlación aceptable, cuando $R^2 > 0.4$. *(>: mayor a)

La **Figura N° 33**, muestra una correlación estadística de $R^2 = 0.086$, entre Al_2O_3 y Minerales de Arcilla, lo que corresponde a una correlación muy baja.

En cambio, la **Figura N° 34**, presenta una correlación aceptable entre Al_2O_3 y Sericita/Muscovita, $R^2 = 0.540$.

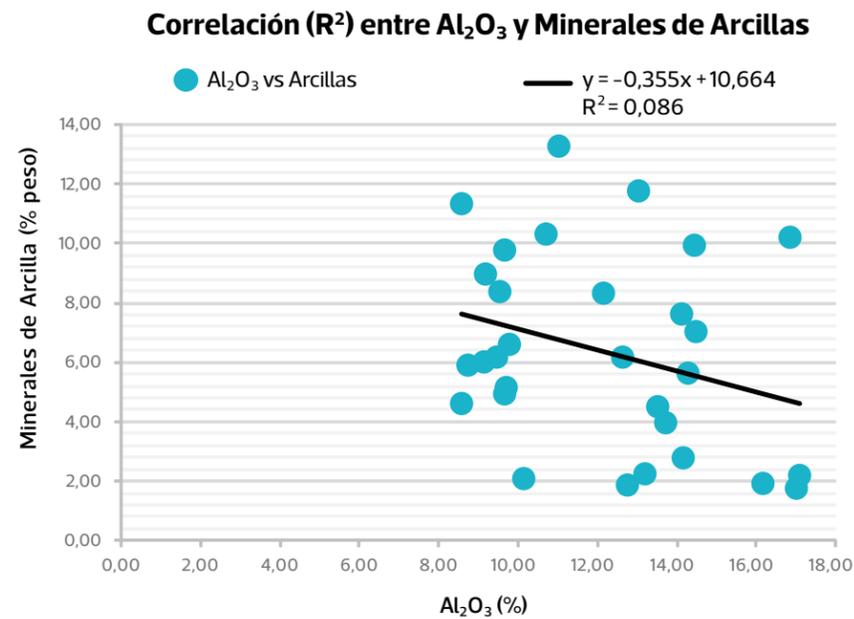


Figura N° 33

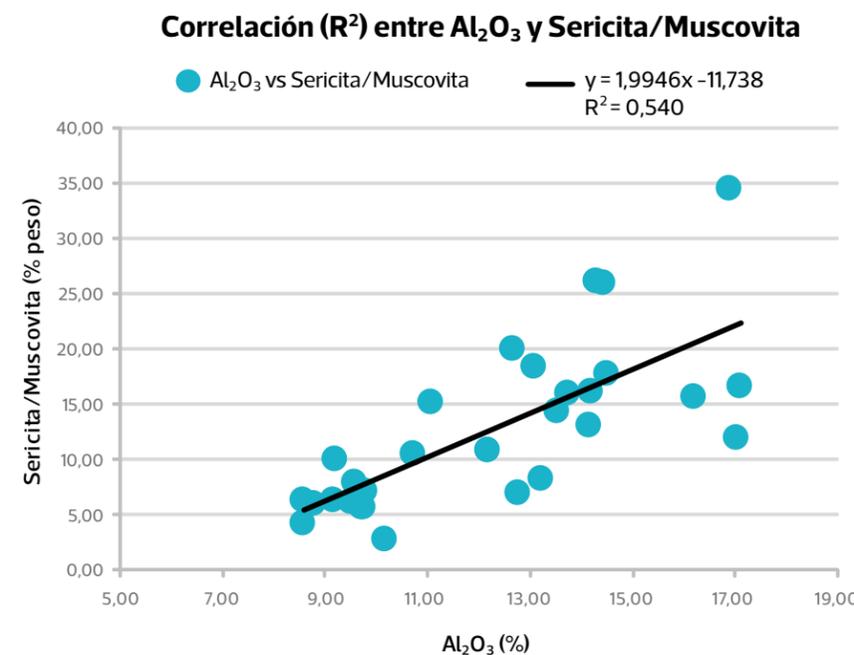


Figura N° 34

8.2

CORRELACIÓN ÓXIDOS MAYORES - ELEMENTOS TRAZA

1. Recopilación de datos químicos del depósito de relave en estudio

Para facilitar la búsqueda de las asociaciones entre óxidos mayores y elementos traza, se pueden usar herramientas estadísticas como el software *IOGAS*, que facilita el manejo de datos geoquímicos (químico y mineralógico, principalmente) a través de la realización de un análisis multivariante.

En este caso utilizaremos **las asociaciones**, mediante análisis de correlación (R^2), que existen entre la alúmina (Al_2O_3) y los elementos traza identificados en el análisis químico.

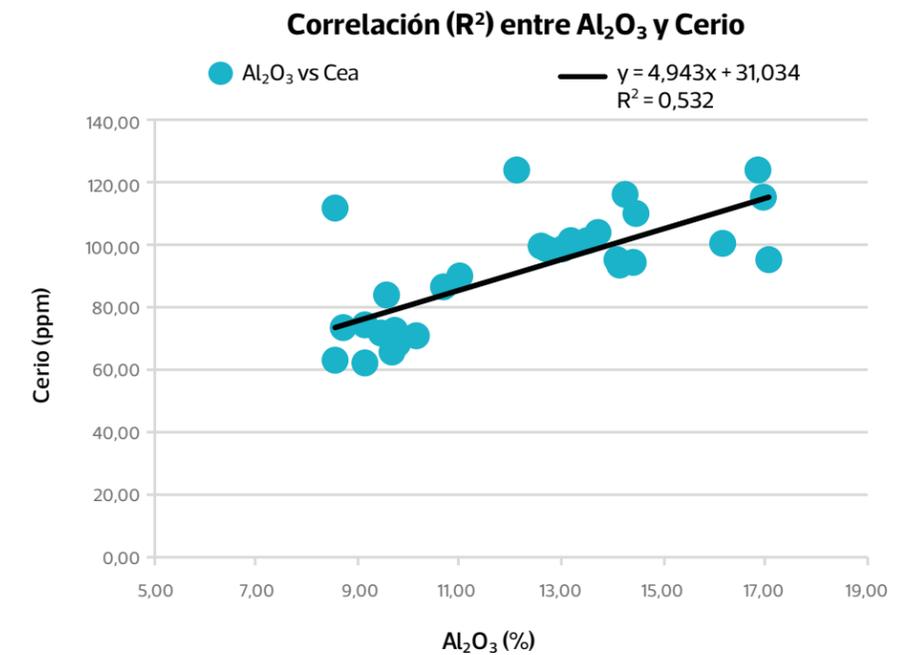


Figura N° 35

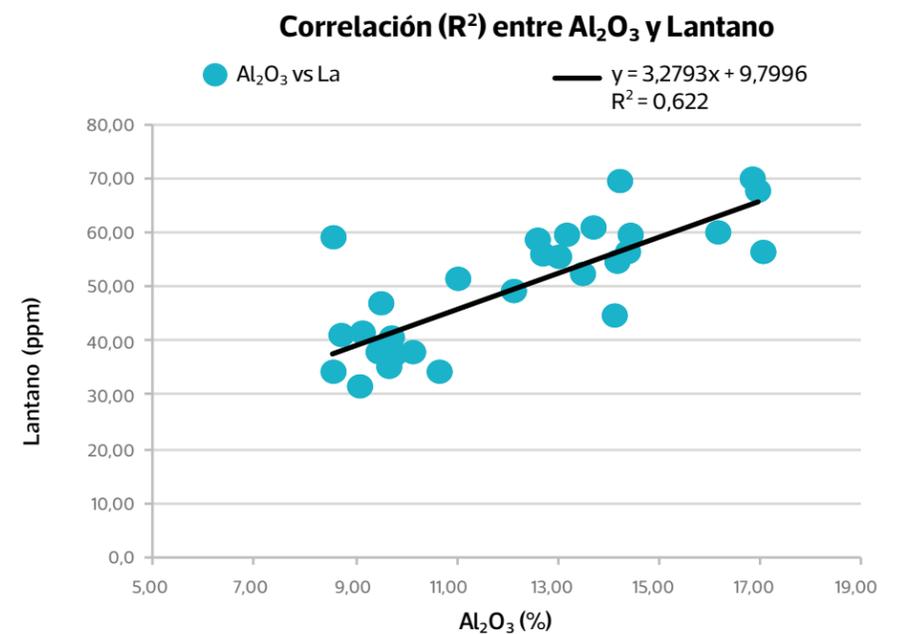


Figura N° 36

A partir de las Figuras N°35 y N°36, se observa que las Tierras Raras, Ce y La, poseen una relación directa con el óxido mayor Al_2O_3 .

8.3

RELACIÓN MINERALOGÍA - ELEMENTOS TRAZA

La ocurrencia de elementos de valor en un depósito de relave siempre estará asociada a alguna especie mineral que ha sido identificada previamente. La génesis de estas especies minerales, indica que algunos elementos de valor pueden alojarse en sus redes cristalinas.

1. Recopilación de datos químicos y mineralógicos

Para concluir, sobre la base de las relaciones encontradas, nos centraremos en los elementos La y Ce, relacionados con la alúmina (Al_2O_3).

Siguiendo el mismo caso, el gráfico de la **Figura N° 37**, muestra la

correlación que obtiene el mayor coeficiente, para el caso, el mineral Sericita/Muscovita con un valor de 0,434.

A partir de las **Figura N° 37 y 38**, se observa que existe una asociación entre el filosilicato Sericita/Muscovita y las tierras raras Ce y La.

2. Análisis gráficos de correlación, comparación de datos

Se verifica la asociación Sericita/Muscovita y las tierras raras Ce y La, mediante los gráficos de correlación (R^2) y las asociaciones entre estos elementos y Al_2O_3 , y la asociación entre alúmina y el mineral Sericita/Muscovita.

Es importante destacar, que los gráficos de correlación pueden entregar asociaciones entre elementos y minerales con una buena correlación matemática y no *petrogenética*. Se enfatiza la necesidad de contar con un experto en geología y mineralogía, para validar las relaciones encontradas en este tipo de análisis.

La herramienta descrita es beneficiosa a nivel exploratorio *(es decir, encontrar las pruebas de lo que se quiere conocer).

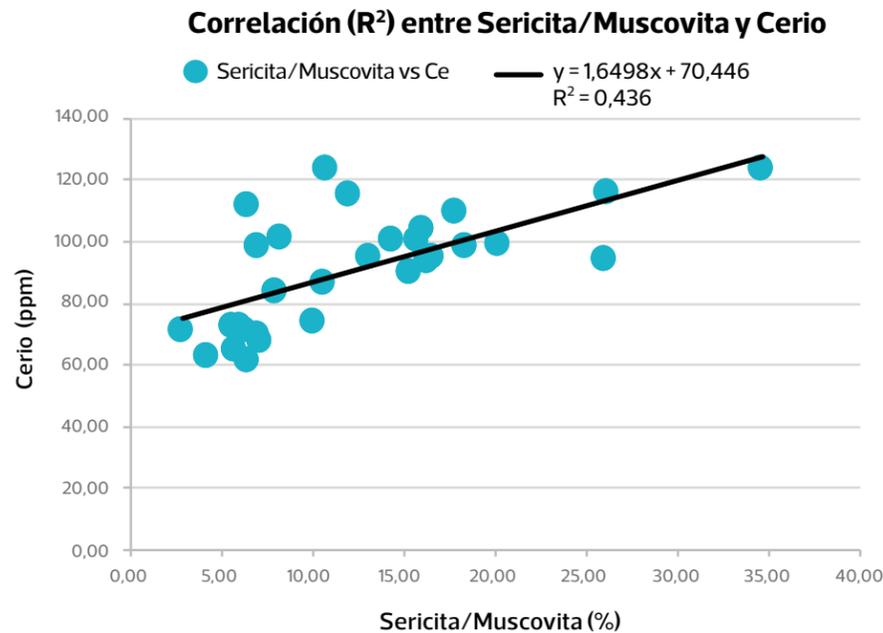


Figura N° 37

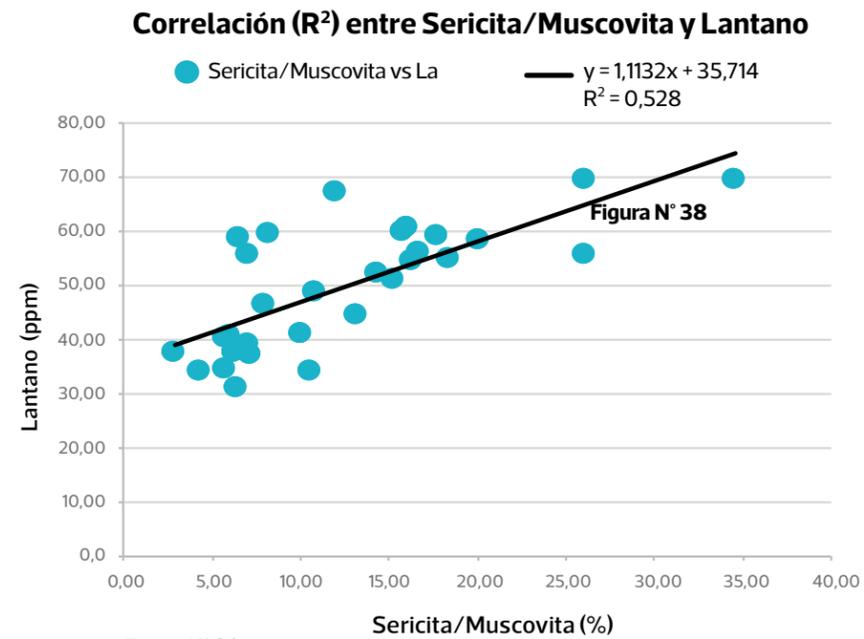


Figura N° 38



Anotaciones

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Ejercitando la memoria

Para evaluar la potencialidad de un relave ¿qué información se requiere?

.....

.....

.....

.....

¿Cómo se expresa la composición química de los minerales?

.....

.....

.....

.....

Para confirmar las relaciones entre mineral y óxido mayor ¿qué se sugiere como método?

.....

.....

.....

.....



CONSORCIO
JRI Ingeniería &
EcoMetales Limited

WWW.RELAVESCONVALOR.CL