



Proyecto apoyado por

CORFO

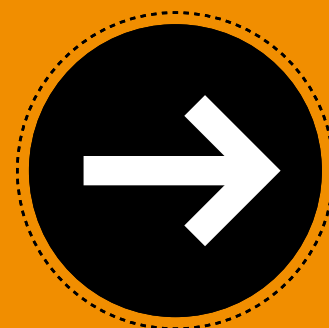
JRI
INGENIERIA

ecometales
LIMITED
FILIAL CODELCO



INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO / 16PTECME-66527

MANUAL DE USO PÚBLICO



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

Manual de Uso Público

Técnicas de perforación,
muestreo y caracterización
Investigación y Desarrollo / 16PTECM -66527
JRI Ingeniería - ECOMETALES Limited

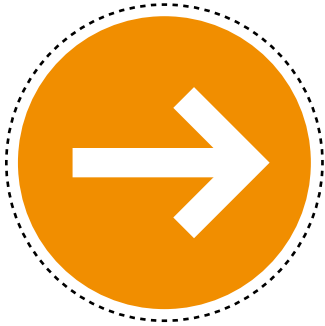
Autora: Irene Aracena Pérez
Coautora: Tania Triviño Madariaga
Editora: María José Luque Guerrero
Diseño Gráfico: 24-7 Comunicaciones
Impresión: Ograma Impresores
Impreso en Chile, Julio 2019

Registro de Propiedad Intelectual N° A305879

ISBN: 978-956-09364-0-0



**MANUAL
DE USO
PÚBLICO**



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



Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	CONCEPTOS Y GENERALIDADES	10
2.1	DEPÓSITO DE RELAVE	10
2.2	RELAVE	11
2.3	EL TRANQUE DE RELAVE	12
2.4	INFORMACIÓN GENERAL	15
3.	MINERALOGÍA FRECUENTE EN DEPÓSITOS DE RELAVE	16
3.1	ESPECIES MINERALES EXISTENTES EN EL RELAVE	16
3.2	ÓXIDOS MAYORES	17
4.	TÉCNICAS DE PERFORACIÓN	21
4.1	SONDAJE DE PERCUSIÓN	22
4.2	SONDAJE DE AIRE REVERSO	22
4.3	SONDAJE DE DIAMANTINA	24
4.4	SONDAJE MANUAL	25
4.5	SONDAJE SÓNICO	26
4.6	SONDAJE CPT - FRX	27
4.7	PERFORACIÓN CON BARRENO	28
5.	TÉCNICAS DE MUESTREO	30
5.1	MUESTREO POR CANALETAS	31
5.2	MUESTREO PUNTUAL	32
5.3	MUESTREO POR DETRITOS	33
5.4	MUESTREO EN CANCHAS, RELAVES, PLACERES, O ZANJAS	34
5.5	MUESTREO POR POZOS	35
5.6	MUESTREO EN PUNTOS DE EXTRACCIÓN: MARINAS	36
5.7	RECOMENDACIONES	37
6.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO	38
6.1	ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	38
6.2	FLUORESCENCIA DE RAYOS X	39
6.3	ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE	40
6.4	ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA	41
7.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO	42
7.1	MICROSCOPIO DE LUZ POLARIZADA	42
7.2	DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X	44
7.3	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA	45
7.4	ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA CERCANA	47
8.	ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES	48
8.1	RELACIÓN ÓXIDOS MAYORES - MINERALOGÍA SILICATOS	48
8.2	CORRELACIÓN ÓXIDOS MAYORES - ELEMENTOS TRAZA	51
8.3	RELACIÓN MINERALOGÍA - ELEMENTOS TRAZA	52
	GLOSARIO	54
	BIBLIOGRAFÍA	58



Introducción

El Programa Investigación y Desarrollo para la Recuperación de Elementos de Valor desde Relaves, impulsado por CORFO, nace considerando la creciente demanda a nivel mundial, de 20 elementos químicos definidos por la Unión Europea (UE) como escasos y estratégicos para el desarrollo de tecnologías de última generación. Estos componentes son: Antimonio, Berilio, Boratos, Cromo, Cobalto, Carbón de Coque, Espato flúor, Galio, Germanio, Indio, Magnesita, Magnesio, Grafito Natural, Niobio, Metales del grupo Platino; Roca de Fosfato; Tierras Raras (livianas y pesadas), Silicio Metálico y Tungsteno.

Estudios realizados por instituciones públicas y privadas como JRI, CAMCHAL-BGR, SERNAGEOMIN y COCHILCO evidencian la presencia de estos elementos en relaves de cobre chileno, activos, inactivos y abandonados. Los resultados de dichos estudios han permitido poner atención sobre los relaves como potenciales fuentes proveedoras de *elementos trazas* con valor económico, lo que redundará en potenciales innovaciones, sea en los procesos de extracción como en la disposición de estos residuos mineros, los cuales en algunos casos se encuentran en condiciones sub-estándar de almacenamiento.

Las reglamentaciones medioambientales, cada vez más estrictas, conforman un escenario propicio que favorece la realización de este tipo de iniciativas: la recuperación de elementos de valor desde relaves, la liberación de espacio físico y la generación de recursos que ayuden a financiar el cierre de faenas, son oportunidades y desafíos para la sustentabilidad de un modelo de negocio en esta área.

La producción de cobre trae consigo la generación de enormes cantidades de residuos (Residuos Mineros Masivos, RMM), como rípios de lixiviación, escorias de fundiciones y *relaves de flotación*. En Chile se generan anualmente alrededor de 530 millones de toneladas de relaves, estimándose que para el 2025, se llegarán a producir más de mil millones de toneladas al año.

El programa propuesto generará diversos beneficios productivos, socio-ambientales, de innovación tecnológica, aumento de recursos mineros, empleo, financiamiento de planes de cierre de faenas y orientaciones para la toma de decisiones respecto al tratamiento de residuos mineros masivos en estado de abandono, aportando de paso a la imagen de la minería nacional. En la misma línea, se puede generar un área de minería secundaria, exportable a distintos países, con procesos metalúrgicos conocidos.

Este programa inscribe a la minería en la ruta del *residuo cero* y la *economía circular*, en que la industria se hace cargo de sus residuos, al reciclarlos, reducirlos y reutilizarlos.

PROPÓSITO DEL MANUAL

El propósito de este Manual está inmerso en una etapa de Estudio de Orden de Magnitud (o Ingeniería de Perfil, o Exploratoria en un proyecto de Exploración geológica), que considera los primeros pasos que se deben realizar al momento de evaluar o estudiar un depósito de relave. Es decir, antes de diseñar un programa de perforación y evaluación de reservas es necesario conocer la composición química y mineralógica de las rocas que componen el relave (donde es posible encontrar los elementos de valor),

con un muestreo que puede ser puntual, de canaleta o barreno, por mencionar algunos. La tecnología que se use dependerá de las características (por ej.: altura, compactación, acceso, etc.) del relave.

La exploración de un *yacimiento fresco* y de un *depósito de relaves* son muy diferentes, aunque en ambos casos los productos a extraer sean los minerales. La *mineralogía* de ambos es distinta, es decir, las propiedades físicas y sus componentes químicos: en el relave, los minerales tienen cambios químicos, por ocasión de la migración de elementos y la contaminación de aguas superficiales e infiltradas.

Explorar y caracterizar mineralógicamente un relave, es decir, dimensionar cuantitativa y cualitativamente qué elementos de valor contiene, dónde se encuentran, en qué forma, asociados a que elementos mayores, implica definir nuevos *enfoques, técnicas y metodologías*.

Explorar un relave trae consigo evaluar aspectos como el tipo y cantidad de recursos presentes; ¿solamente cobre y/u otros elementos de valor? o, ¿cuál es el tamaño mínimo del recurso encontrado para que se sostenga un negocio?

La ubicación y accesos al relave son otro aspecto a considerar: ¿hay caminos, acceso a agua, energía y disponibilidad de infraestructura y centros de procesamiento cercanos?.

Finalmente, está el tema del financiamiento: ¿qué disposición hay a compartir riesgos y potenciales beneficios por parte de las instituciones interesadas?

Desde estas interrogantes, este manual tiene como propósito *aportar con información relevante que permita caracterizar de manera temprana el potencial económico de un depósito de relaves. Y al mismo tiempo entregar herramientas para el reconocimiento de su posible valor y poder decidir si invertir para explotarlo o descartarlo de las estrategias de recuperación de elementos de valor*.

Es importante también tener la información legal precisa para iniciar faenas de exploración y estudios de relaves: Faenas mineras (Ley 20.551); Reglamentos de seguridad minera y Reglamentos para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves (DS 248).

En función de lo anterior, este documento resume las principales técnicas de búsqueda y exploración de potenciales elementos de valor presentes en relaves. El uso de estas técnicas debe ser asesorado por profesionales expertos (geólogos, ingenieros de mina, de procesos, entre otros) quienes podrán diseñar un programa de explotación bancable, tras el análisis de los datos obtenidos en la primera fase de ingeniería de perfil que sustenta el manual, reduciendo así, la incertidumbre que significa la explotación de un recurso minero.

- TÉCNICAS DE PERFORACIÓN
- TÉCNICAS DE MUESTREO
- TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO

- TÉCNICAS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO
- ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES

2

Conceptos y Generalidades

2.1 DEPÓSITO DE RELAVE

Un depósito de relave se puede definir como un potencial yacimiento de origen minero secundario, residual, proveniente de un yacimiento geológico de minerales que han sido explotados para recuperar algunos elementos abundantes en Chile, como cobre (Cu), hierro (Fe), plata (Ag), oro (Au), plomo (Pb), molibdeno (Mo) y zinc (Zn), entre otros.

La *ocurrencia* de los mencionados elementos, principalmente como *sulfuros u óxidos*, tiene su origen en las condiciones genéticas dadas por la composición química, presión y temperatura, entre otros, que operaron durante su formación geológica, y que refleja la composición química y mineralógica del yacimiento original.

Las propiedades físicas de los elementos originales y de los relaves se pueden dividir en especies minerales de alta concentración (silicatos, carbonatos, óxidos de Fe, aluminio, etc.) apreciables a simple vista (concentraciones en % peso), y en *elementos traza*, es decir, en concentraciones de partes por millón (**ppm**) o partes por billón (**ppb**), alojados en las *redes*

cristalinas de los minerales que forman parte de un relave.

Para determinar la ocurrencia de minerales, y sobre todo de elementos traza (concentración o ausencia), objetivo central de la “Caracterización de Elementos de Valor de Relaves”, es necesario conocer la *afinidad química* y *afinidad genética* que tienen los elementos traza con los minerales que los contienen. Para ello es preciso diseñar un *método de muestreo*, que permita captar u observar su presencia en las especies minerales que componen un relave.

Con este propósito se diseñó un *método de búsqueda de las especies minerales visibles y cuantificables* para encontrar *elementos traza* de valor. Por ejemplo, los óxidos mayores que forman parte de las especies minerales silicatadas de un depósito de relave son, en su mayoría: $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5$ y S total. Como guía de búsquedas, se usaron las técnicas de identificación y cuantificación de especies minerales *FRX* y *QEMSCAN*.

En este manual no se incluyen los costos de las técnicas descritas, debido a su variabilidad en el mercado.

2.2 RELAVE

El depósito de relaves es un conjunto de material no consolidado, muros de contención (cuando corresponde) y laguna de aguas claras (dependiendo del tipo y si son activos), material que es producido en el proceso de flotación.

Es así como en la explotación de yacimientos de minerales de cobre, se extraen grandes cantidades de roca de las cuales, menos del 0,1%, corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (Figura 1). El resto del material (99,9%) corresponde a minerales de ganga (muy pobre en el elemento extraído) que mediante un proceso de concentración y flotación son reportados como residuos, recibiendo la denominación de *relave*.

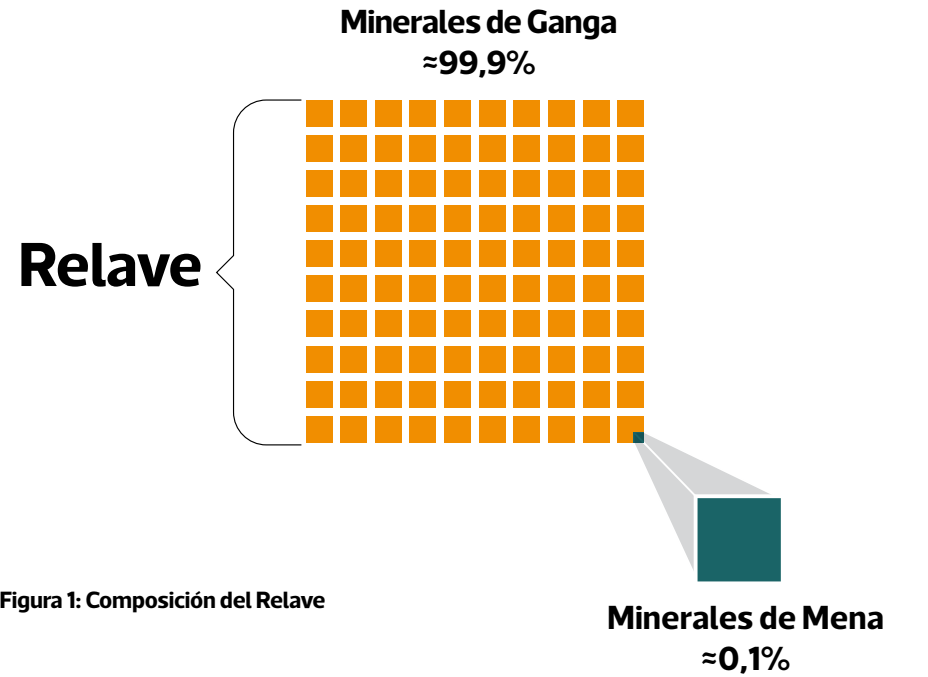


Figura 1: Composición del Relave

Este residuo debe ser depositado en forma segura y ambientalmente responsable, en conformidad a las normativas legales vigentes.

2.3

EL TRANQUE DE RELAVE

El agua que se ha utilizado en el proceso de concentración de cobre y, en todo proceso productivo, no puede arrojarse a los afluentes naturales, porque tiene contaminantes. Este tipo de aguas se deposita en estos tranques (**Figura 2**).

Estructura de un tranque

Cubeta: volumen físico disponible para el depósito de relaves, junto con gran parte del agua de los relaves. En la cubeta, el agua se localiza en la Laguna de Aguas Claras.

Laguna de Aguas Claras: el agua forma esta laguna debido a la sedimentación de las partículas finas. La disposición de relaves (lamas) en la cubeta implica el uso de agua para su transporte.

Precipitación

Evaporación

Sólidos finos: material particulado menor a 2 micrones.

Membrana

Drenaje subterráneo

Playa activa: zona donde se descargan los relaves en la cubeta. Usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas.

Descarga relave

Coronamiento: parte superior del muro de contención.

Rebalse de emergencia

Muro de contención: obra de ingeniería que permite contener los relaves que se descargan en el tranque y delimita la cubeta.

Sistema de drenaje: utilizado para retirar al grado adecuado de agua al interior del muro, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro.

Figura 2: Tranque de Relave

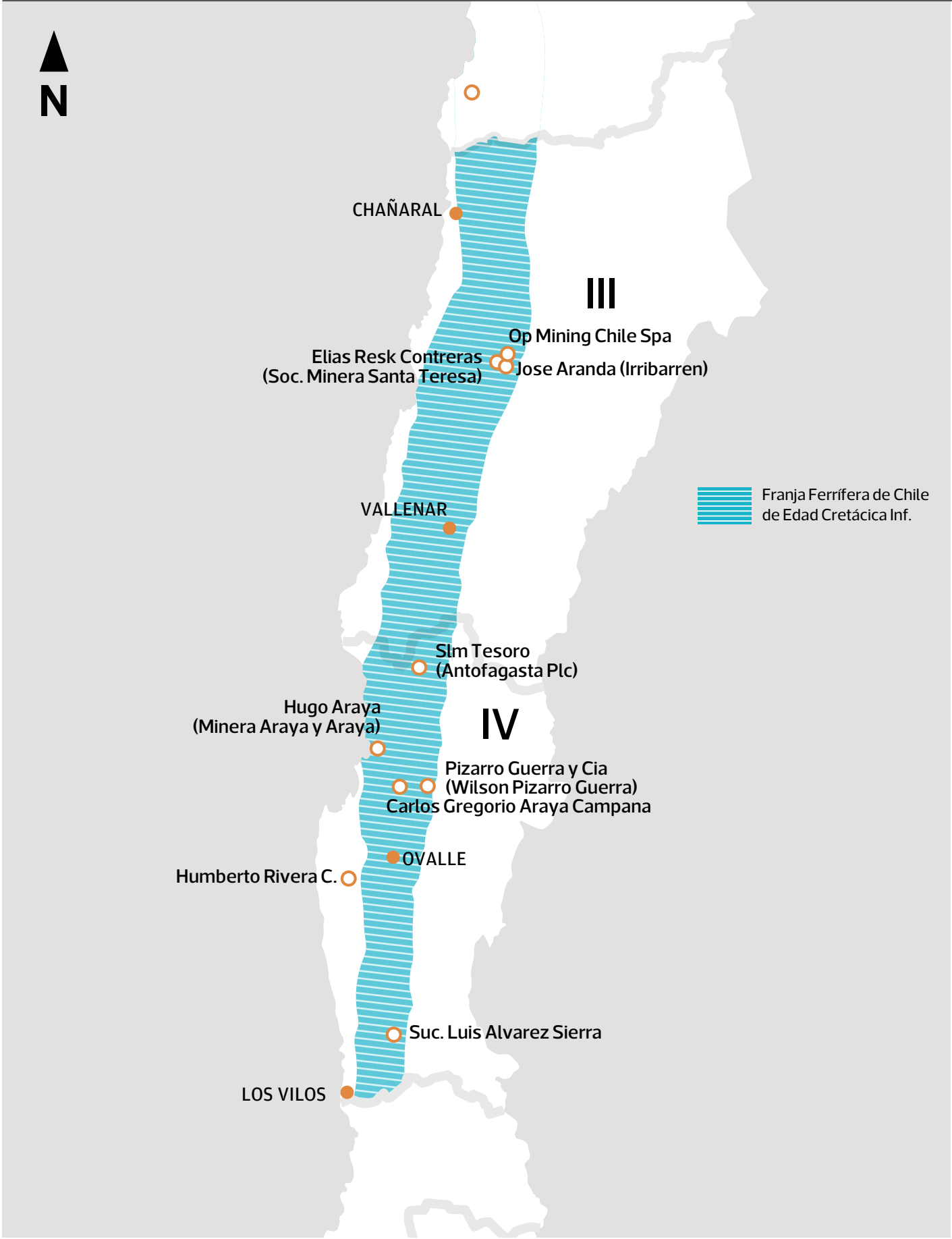


Figura 3: Franja Ferrífera de Chile

2.4

INFORMACIÓN GENERAL

En 2018, SERNAGEOMIN, cadastró 740 depósitos de relaves, de los cuales 101 están activos, 469 inactivos y 170 abandonados.

Del total, 22 corresponden al segmento de la Gran Minería, representando 98,6% de la masa de relaves existentes en Chile. El restante 1,4% se encuentra en numerosos depósitos de relaves pequeños.

La mayor cantidad de depósitos de relaves está en la Región de Coquimbo, con 386 depósitos; le sigue la Región de Atacama, con 161 depósitos; la Región de Valparaíso, con 81 depósitos y la Región de Antofagasta con 47.

La presencia de variadas *franj*as metalogénicas (7 en total) incide en el recurso mineral presente en distintas zonas del país. En este manual se alude a la Franja Ferrífera, que ha sido estudiada anteriormente, en relación al comportamiento de los relaves que se encuentran dentro de esta zona (Figura 3).

La Franja Ferrífera está localizada en la Cordillera de la Costa, a lo largo de la III Región de Atacama y la IV Región de Coquimbo, regiones que tienen la mayor concentración de depósitos de relaves a nivel nacional.

En estudios, como el de Triviño (2018), se han encontrado relaciones entre las cantidades importantes de óxido de hierro (Fe_2O_3) que caracteriza a esta franja, y la acumulación de ciertos elementos de valor. Por lo tanto, es posible afirmar que estas regiones poseen un gran potencial en sus relaves, abriendo la posibilidad a su estudio y exploración.



Ejercitando la memoria

En las siguientes líneas defina lo que es un relave.

Qué aguas se depositan en los tranques de relave.



Anotaciones



Mineralogía frecuente en depósitos de relaves

3.1 ESPECIES MINERALES EXISTENTES EN EL RELAVE

De acuerdo a la geología de nuestro país, las especies minerales más comunes son las siguientes:

SiO₂ (Óxido de Silicio)

Forma parte de las siguientes especies minerales identificadas en relaves chilenos: *Cuarzo*; *Feldespatos* (Plagioclasa, Albita, Ortoclasa/Microclina); *Ferromagnesianos* (Biotita/Flogopita, Anfíbol, Piroxeno, Turmalina, Epidota); *Esfeno* (CaTiSiO₅); *Filosilicatos* (minerales de Arcillas, Sericita/Muscovita, Biotita/Flogopita, Clorita); entre otros.

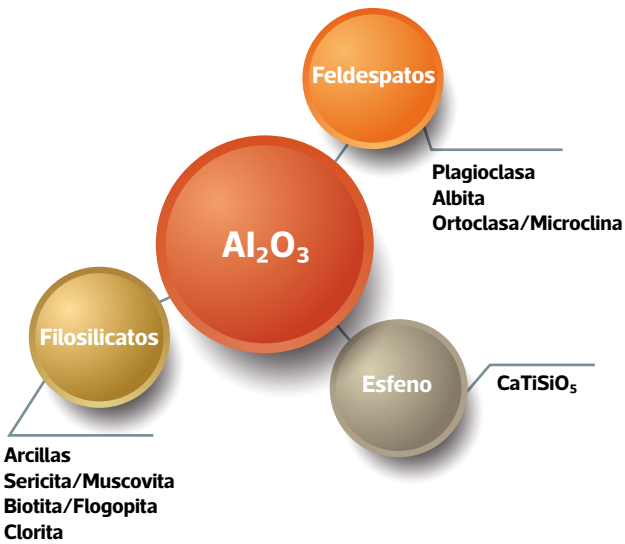


3.2 ÓXIDOS MAYORES

Los *óxidos mayores* forman parte de las especies minerales de un depósito de relave, especialmente de los minerales de ganga. Se pueden identificar y cuantificar a través de la técnica FRX (Fluorescencia de Rayos X). Los *óxidos mayores* que frecuentemente se analizan, son: SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, P₂O₅.

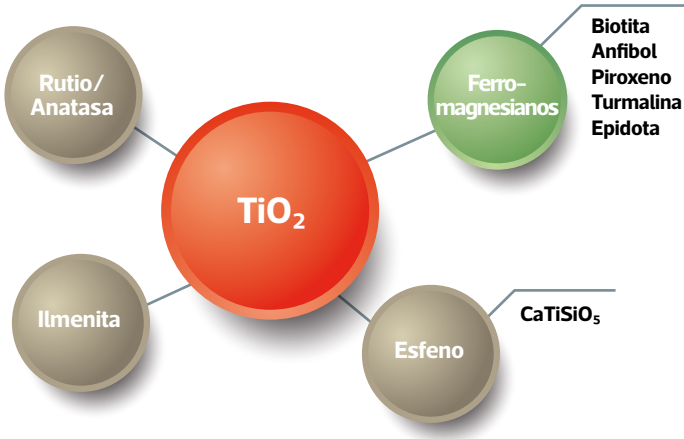
Al₂O₃ (Óxido de Aluminio)

También está presente en muchos silicatos (minerales que forman las rocas): *Fesdespatos* (Plagioclasa, Albita, Ortoclasa/Microclina); *Esfeno*; *Filosilicato* (minerales de Arcilla, Sericita/Muscovita, Biotita/Flogopita, Clorita).



TiO₂ (Óxido de Titanio)

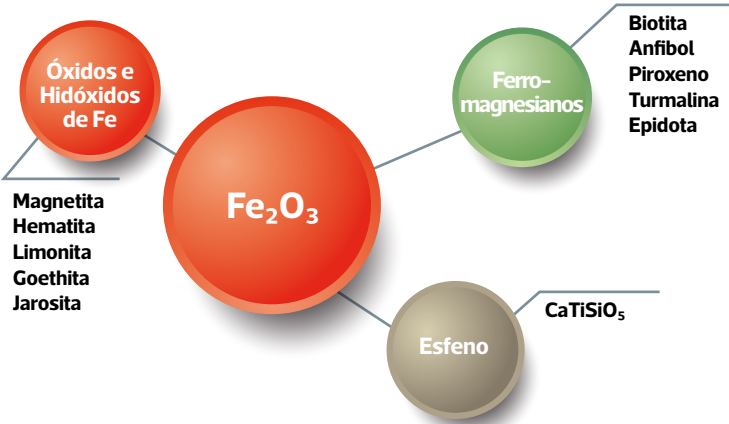
De escasa ocurrencia en las rocas chilenas, siempre se encuentra presente como *Rutilo* o *Anatasa*. Además, forma parte de *Ferromagnesianos* (Biotita, Flogopita, Piroxeno, Turmalina, Epidota); *Ilmenita*; *Esfeno*.



Fe₂O₃

(Óxido de Hierro)

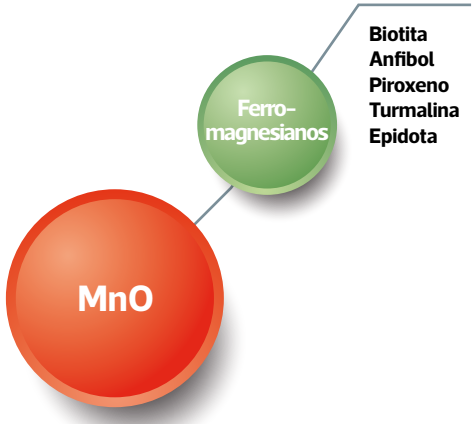
Muy común en las rocas chilenas, como *Óxido e Hidróxido de Fe* (Magnetita, Hematita, Limonita, Goethita); especialmente en zonas *lixiviadas*.



MnO

(Óxido de Manganeseo)

El manganeso es un elemento escaso, de baja concentración en los depósitos de relave, y frecuentemente aparece como traza en las redes cristalinas de algún silicato u óxido.



CaO

(Óxido de Calcio)

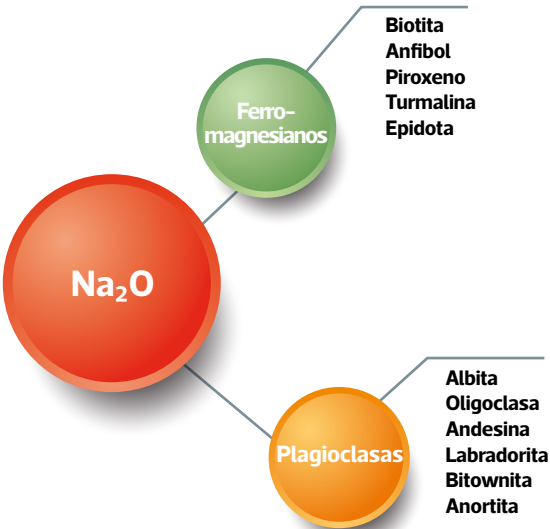
Los minerales que contienen Ca, son muchos y variados.



Na₂O

(Óxido de Sodio)

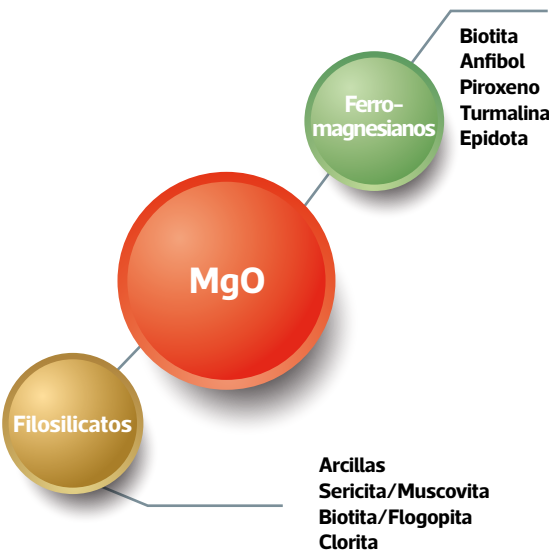
Es común en los depósitos de relave en forma de *Plagioclasa*, frecuentemente.



MgO

(Óxido de Magnesio)

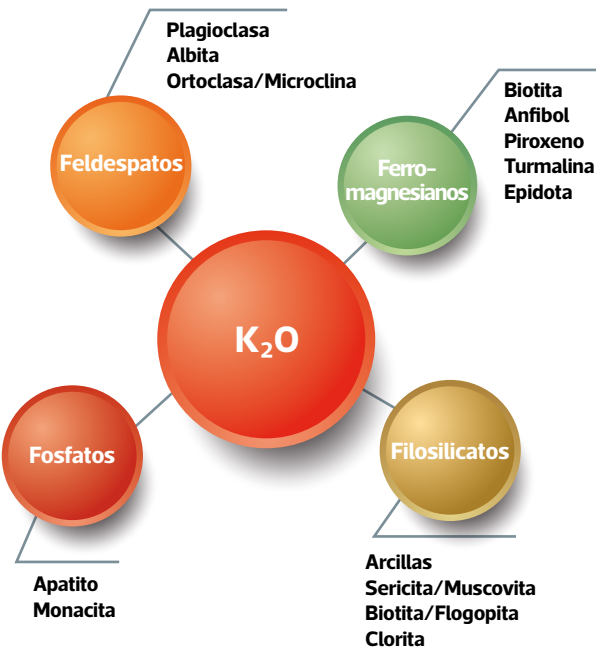
Los principales silicatos y óxidos que contienen Mg, en general, presentan una apariencia de color verde oscuro, pardo oscuro o pardo, a veces negro como el caso de la *Biotita*.



K₂O

(Óxido de Potasio)

Frecuente en los *Feldespatos* y *Ferro-magnesianos* como la *Biotita*.





4.1

SONDAJE DE PERCUSIÓN

Eficiente en suelos granulares medios a finos, se usa cuando el terreno es fracturado y no consolidado, como en rajos abiertos, gravas y placeres.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Empleo de maquinaria de costo moderado ● Simplicidad de las operaciones ● Poco personal necesario ● Escaso consumo de agua	● Necesidad de personal calificado ● Interrupción de la perforación para la limpieza ● Avance lento en rocas duras ● Dificultad de avance en suelos blandos, libres de piedras o rocas ● Limitación de la profundidad de perforación (no resulta económico a partir de 150 m) ● Tiempo de traslado de la maquinaria depende de las pendientes y caminos de acceso al depósito

4.2

SONDAJE DE AIRE REVERSO

Consiste en ir triturando la roca en tanto que el *detrito* – o polvo que se genera – se eleva por medio de aire comprimido y es dirigido hacia el fondo del pozo (**Figuras 5 y 6**). Es a través de las barras de doble pared, en que permite recuperar los detritos producidos en el fondo, con un mínimo de contacto con las paredes del pozo, lo que genera poca contaminación.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Tasas de penetración más altas que la perforación de diamantina ● Empleo de maquinaria de menor costo que perforación de diamantina	● Requiere de un equipo de mayor tamaño, incluyendo un compresor de aire de alta capacidad, usualmente montado en un camión ● La muestra consiste en pequeños trozos de roca y material pulverizado (detritos) en lugar de una roca sólida ● Tiempo de traslado de la maquinaria depende de las pendientes y caminos de acceso al depósito



Figura 5, Izq.: Maquinaria de Sonda de Aire Reverso. Der.: Muestras obtenidas mediante sonda de Aire Reverso

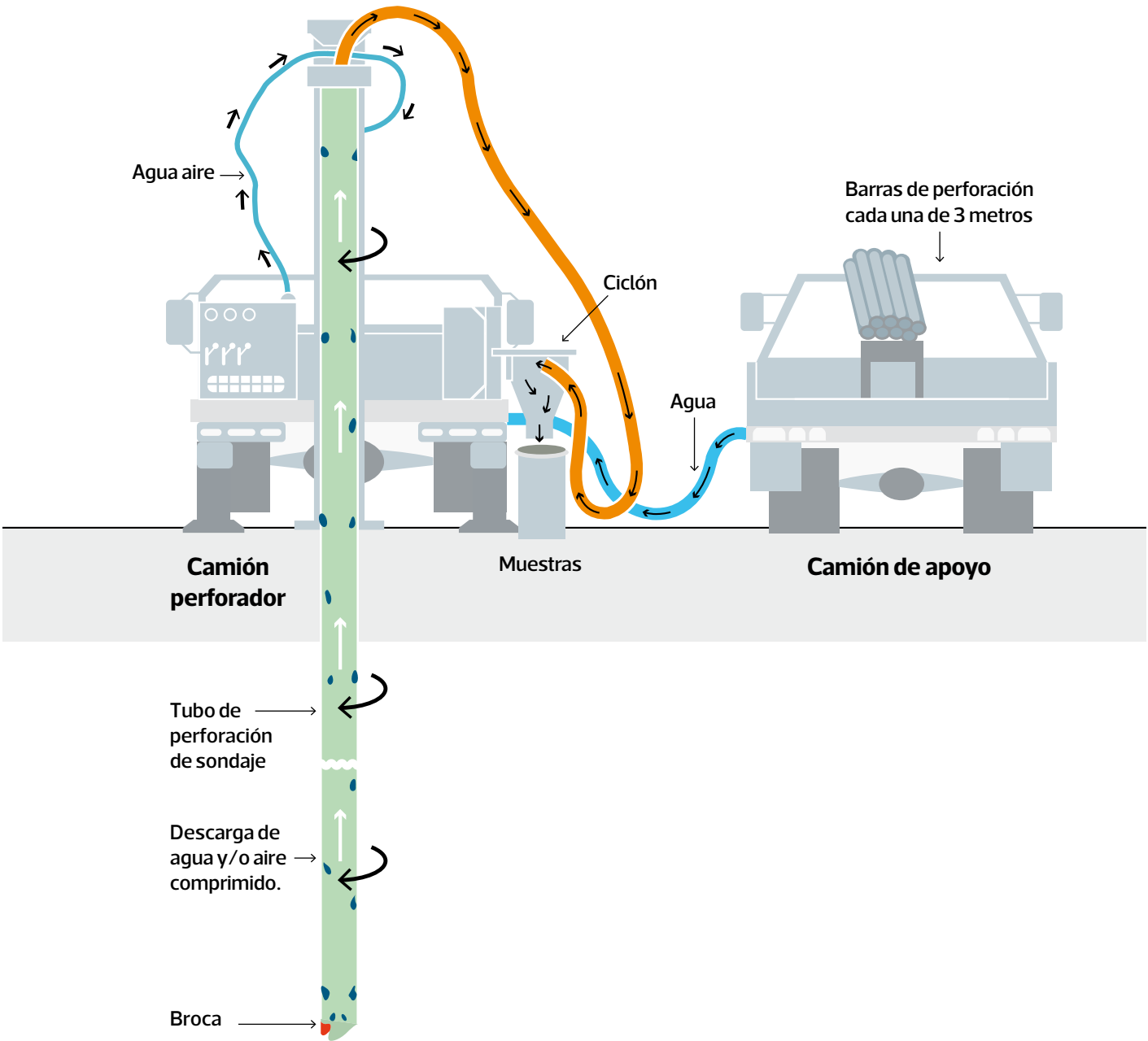


Figura 6: Sistema de perforación de Aire Reverso

4.3

SONDAJE DE DIAMANTINA

Consiste en la extracción de *muestras cilíndricas* (testigos), mediante la perforación de la roca, con broca de diamantina (**Figuras 7 y 8**). La muestra ideal se presenta, cuando la recuperación del cilindro es mayor o igual al 90%. Cabe recordar que el estudio del testigo es responsabilidad de un geólogo.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Recuperación de testigos cilíndricos sólidos ● El estudio del testigo entrega información valiosa, como orientación de las capas, vetas, potencia de la veta, estructuras en general, mineralización, textura de la roca y asociaciones mineralógicas	● Utiliza mucha agua ● Presenta los costos más altos en comparación al resto de los tipos de sondajes ● Tiempo de traslado de la maquinaria depende de las pendientes y caminos de acceso al depósito



Figura 7 Izq.: Maquinaria sondaje de diamantina

Figura 8 Der.: Muestras obtenidas con sondaje de diamantina

4.4

SONDAJE MANUAL

Se extrae la muestra mediante el empleo de barrenos manuales, en puntos regularmente espaciados, alcanza profundidades de 2 a 5 metros (**Figura 9**).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Fácil transporte y acceso a los depósitos ● Presenta el menor costo en comparación al resto de los sondajes ● Necesita poco personal ● Técnica poco invasiva con el medioambiente	● Solo para muestras superficiales (menores a 5 m) ● Solo se puede utilizar en suelo blando

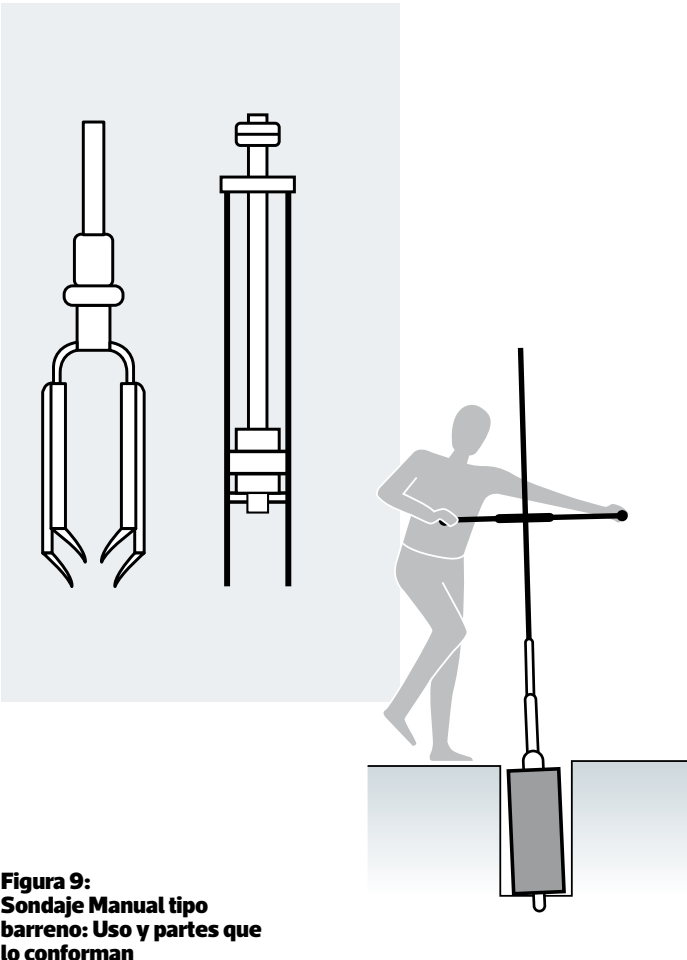


Figura 9: Sondaje Manual tipo barreno: Uso y partes que lo conforman

4.5

SONDAJE SÓNICO

El sondaje sónico es una técnica muy efectiva en terrenos blandos, en que una sonda con sistema de ultrasonido penetra el terreno **(Figura 10)**.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● No requiere plataformas de perforación ● La máquina se puede montar sobre un camión ● Buena recuperación del testigo in situ (>90%) ● Bajo consumo de agua ● Necesita poco personal ● Técnica poco invasiva con el medioambiente	● No funciona óptimamente en suelos muy duros ● Tiempo de traslado de la maquinaria depende de las pendientes y caminos de acceso al depósito



Figura 10: Muestras obtenidas en sondajes con sonda sónica

4.6

SONDAJE CPT-FRX

El sondaje CPT-FRX (FUGRO) permite obtener información en línea sobre varios elementos que constituyen el depósito, a través de tecnología de Rayos X **(Figura 11)**.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Obtención de leyes de ciertos elementos en una cantidad acotada de tiempo (36 horas) ● Necesita poco personal ● No necesita plataforma de perforación ● Obtención de datos en tiempo real ● Obtención de datos geotécnicos y de napa al mismo tiempo	● No perfora en suelos duros o muy compactos ● Tiempo de traslado de la maquinaria depende de las pendientes de acceso y caminos al depósito ● Costos elevados ● Requiere personal calificado ● Requiere supervisión especializada



Figura 11: Maquinaria Fugro Sondaje CPT-FRX

4.7 PERFORACIÓN CON BARRENO

La perforación con barreno (Auger Drilling) es uno de los métodos más efectivos para sedimentos no consolidados o rocas blandas a profundidades relativamente bajas. Generalmente se hace sin usar aire, agua o cualquier otro medio para limpiar el agujero.

La industria usualmente usa un límite de profundidad de 30,48 m, pero se han realizado perforaciones e instalación de pozos de observación a profundidades de 300 pies (91,44 m) (Shuter y Teasdale, 1989).



Figura 12. Máquina Auger Drilling montada en oruga

VENTAJAS



- La perforación es relativamente rápida, especialmente en aplicaciones poco profundas, en sedimentos pobremente litificados o no consolidados
- Se requiere poco o ningún fluido exterior en el proceso de perforación
- Es posible obtener muestras no contaminadas e inalteradas, representativas de formaciones superficiales y no consolidadas
- Las plataformas de perforación son relativamente simples
- Los equipos son ubicados sobre orugas, de peso y dimensiones adecuadas para facilitar el acceso al área a explorar
- A medida que se realiza el agujero de perforación, este simuladamente es tapado, evitando los agujeros en el suelo

DESVENTAJAS



- Se limita a la perforación en sedimentos pobremente litificados, a una profundidad máxima de aproximadamente 91,44 m. En materiales difíciles de perforar, la profundidad puede reducirse significativamente
- Las altas presiones hidrostáticas en el orificio pueden causar problemas con la arena que se eleva en las barrenas durante el muestreo y los procedimientos de instalación
- La tasa de penetración no puede exceder la velocidad de retorno de los cortes a la superficie, de lo contrario se dificulta el desplazamiento de la muestra a superficie

Ejercitando la memoria

Si las condiciones del terreno es "fracturado y no consolidado" ¿Qué sondaje de percusión usaría?

El sondeo que ud. ha seleccionado ¿Qué ventajas entrega?

¿Cuál de los sondeos descritos anteriormente presenta mayores desventajas por el exceso de uso de agua y su alto costo?

Anotaciones

A series of horizontal dotted lines for writing.

5

Técnicas de muestreo

Los métodos usados en la toma de muestras, varían de acuerdo con las características del yacimiento o depósito en tipo, forma, extensión, objetivos y alcance del estudio, y sistema de explotación empleado. Los métodos más comunes de toma de muestra son:

- Muestreo por Canaletas
- Muestreo Puntual
- Muestreo de Detritos
- Muestreo por Canchas, Relaves, Placeres o Zanjas
- Muestreo de Pozos
- Muestreo de Carros Mineros
- Muestreo en Punto de Extracción



Obtener una *muestra sin contaminación*, para analizar el contenido de elementos de valor presentes en un relave, es muy importante. En función de ese propósito, hay que desarrollar y poner en práctica procedimientos y métodos, que permitan obtener la información necesaria y precisa que respalde un posterior estudio específico para cada tipo de relave.

5.1 MUESTREO POR CANALETAS

Corresponde al método más adecuado para *muestreo de vetas y mantos*. Por lo general son muestreos manuales y el operador corta, en forma consciente o inconsciente, las partes más blandas de la pared, o que tienen una característica en común, por ejemplo, mismo color (**Figuras 13 y 14**).

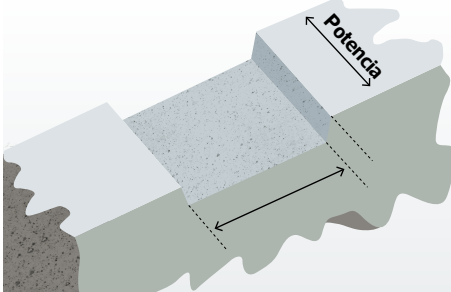


Figura 13: Muestreador de canaleta correctamente diseñada

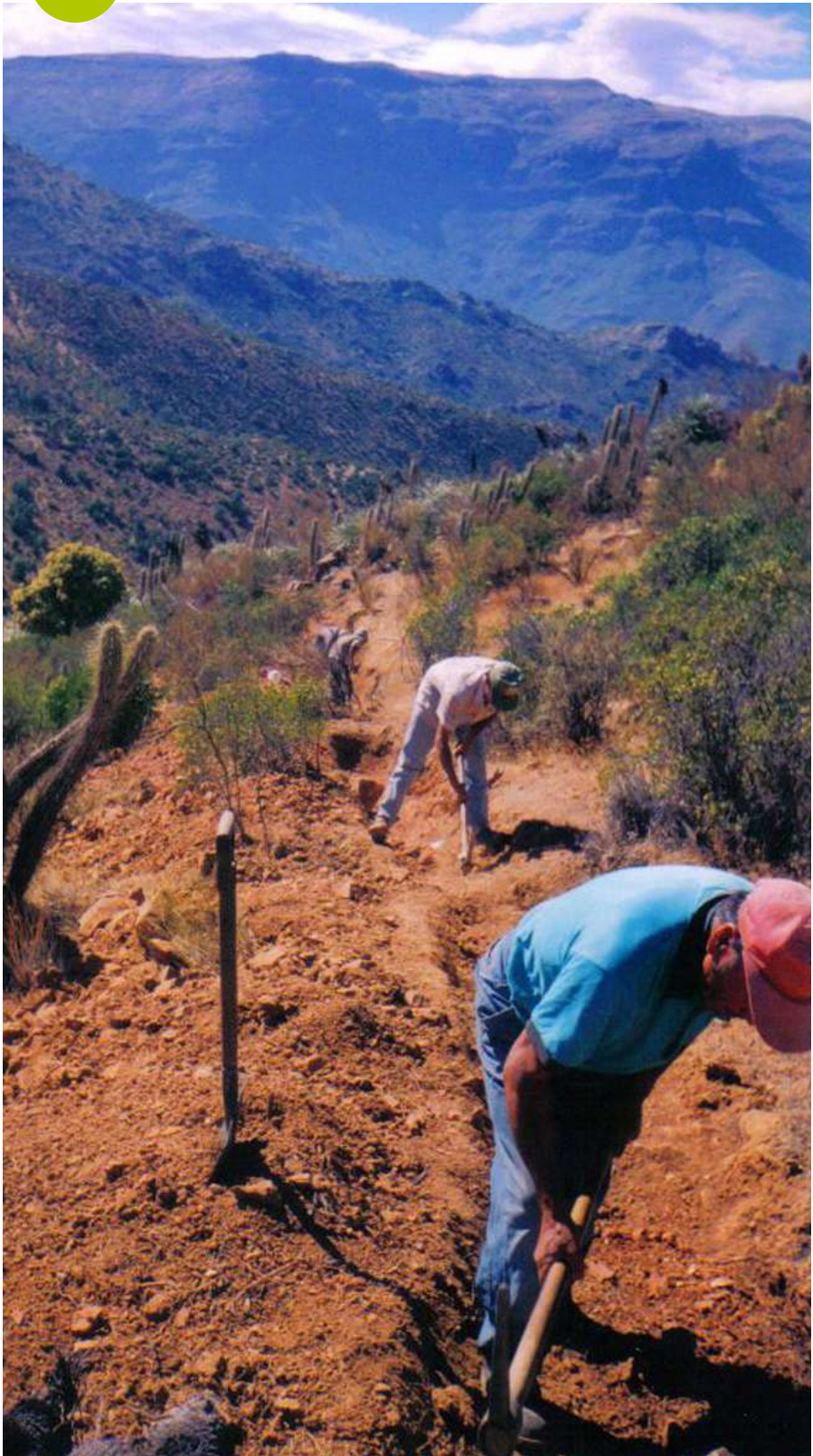


Figura 14: Muestreo por canaleta en afloramiento

5.2

MUESTREO PUNTUAL

Este muestreo consiste en tomar pequeñas porciones de *muestras iguales en peso*, en puntos previamente marcados de acuerdo a una malla, cuyo distanciamiento entre los puntos haya sido previamente establecida, considerando las características geológicas del depósito y, en lo posible, sea igual en todas las direcciones, cuando corresponda con el fin de resolver un objetivo específico (**Figura 15**).

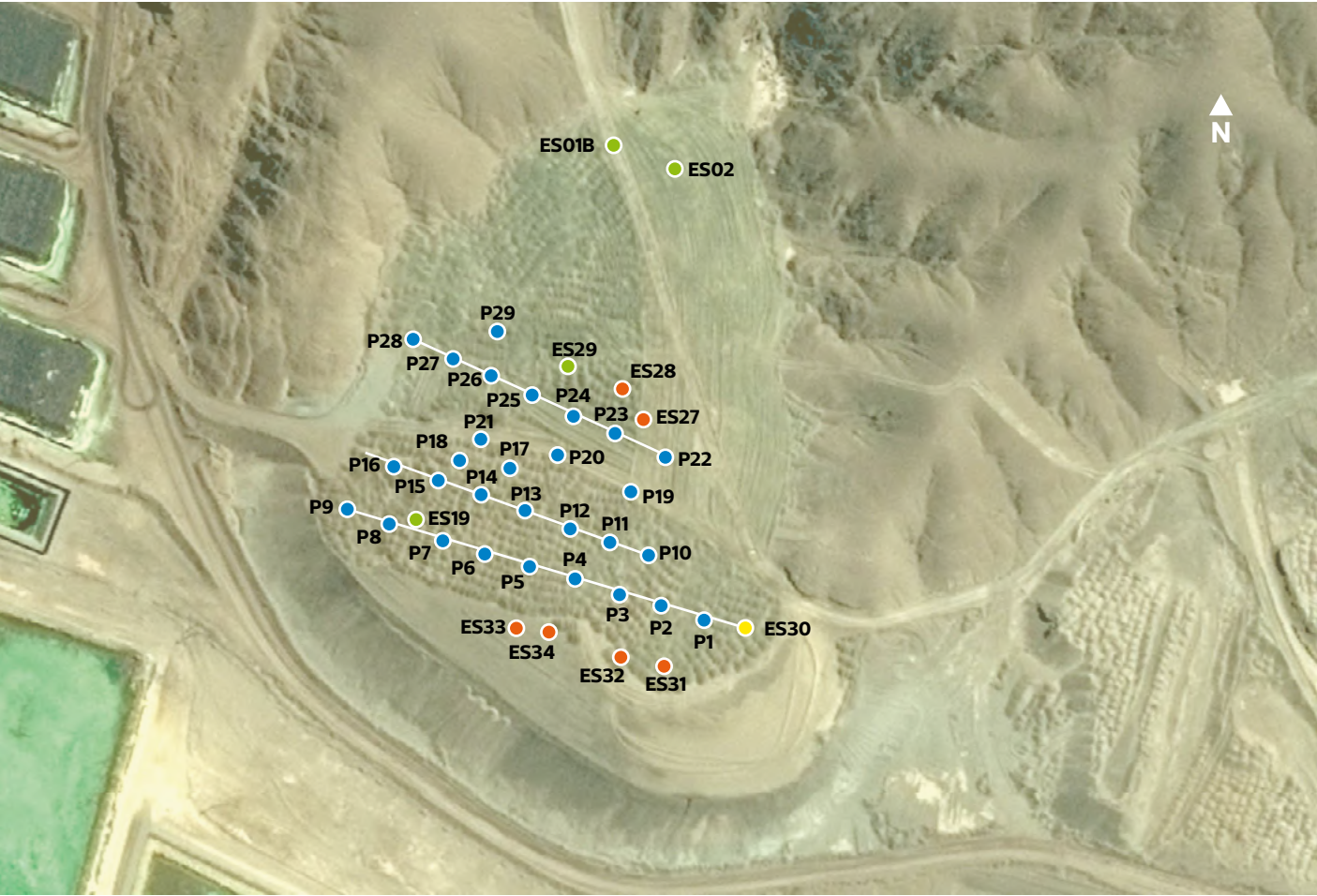


Figura 15: Muestreo puntual de acuerdo a una malla previamente establecida

5.3

MUESTREO POR DETRITOS

Este método es el más sencillo y se aplica a vetas y estructuras mineralizadas (**Figuras 16 y 17**), y consiste en extraer material fragmentado en todo el ancho del sector específico del depósito a muestrear, siguiendo una línea imaginaria que correspondería al eje de un supuesto canal de muestreo. Puede seguirse una línea sinuosa en el caso de que la mineralización sea bandeada.

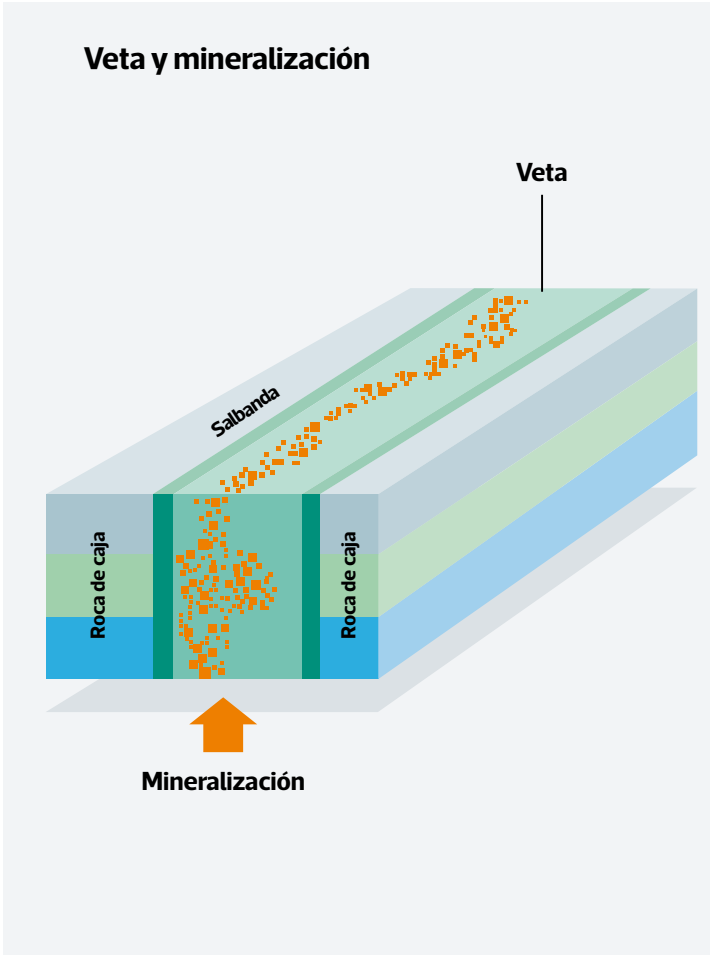


Figura 16: Esquema de una veta y su dirección



Figura 17: Veta mineralizada para muestreo por detritos

5.4

MUESTREO EN CANCHAS, RELAVES, PLACERES, DEPÓSITOS DETRÍTICOS O ZANJAS.

La dificultad de este muestreo está en la variedad del tamaño de los trozos de roca, que van desde bloques grandes hasta polvos muy finos (**Figuras 18 y 19**).



Figura 18: Muestreo de zanja

Figura 19: Cancha de acopio

5.5

MUESTREO POR POZOS

El *muestreo por pozos*, consiste en excavar pozos verticales a intervalos iguales, que atraviesen por completo la cancha de acopio o relave o hasta donde es posible en el depósito con el objetivo de conocer la distribución en profundidad de lo que se está buscando (**Figura 20**).



Figura 20: Muestreo mediante pozos

5.6

MUESTREO EN PUNTO DE EXTRACCIÓN: MARINAS

El muestreo en *puntos de extracción*, de una mina explotada por block-caving, es difícil, debido a que se realiza de manera superficial, además de no ser equiprobable debido a la gran variedad de tamaños en el punto, por ejemplo, bolones de gran diámetro. Lo mismo ocurre con las muestras de marinas (mineral). **(Figura 21)**

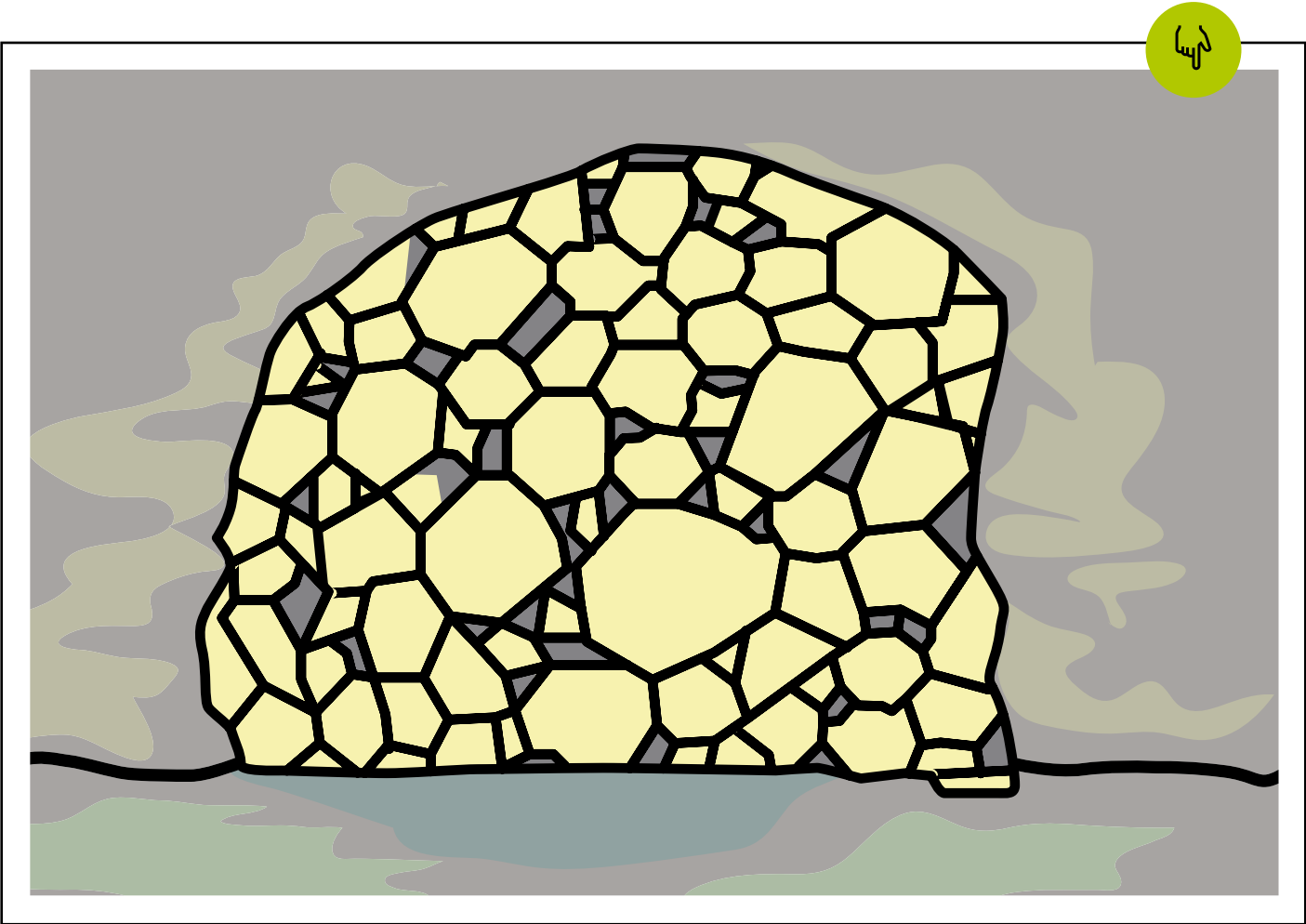


Figura 21: Muestreo de marinas

5.7

RECOMENDACIONES



En todos los métodos señalados anteriormente, es necesario considerar siempre que la muestra no debe ser contaminada, bajo ninguna circunstancia. Otros puntos importantes a tener en consideración son:

- ✓ Los puntos de muestreo deben elegirse sobre la base de un diseño previo, establecido de acuerdo a las características del depósito a muestrear (por ej.: altura, compactación, acceso, etc.).
- ✓ Es necesario descartar la capa superficial (se sugiere de 0,5 a 1 m) del punto de toma de la muestra para evitar contaminación de esta.
- ✓ Bolsas y cajas son recipientes adecuados para contener las muestras. Deben estar en óptimas condiciones de limpieza para evitar la contaminación de la muestra.
- ✓ Todos los instrumentos que se usan para tomar la muestra como pala, cuchara, barreno, etc., deben ser previamente aspirados o lavados antes de ser usados en nuevas muestras.
- ✓ Todas las muestras deben estar debidamente etiquetadas con una numeración clara y visible para todos los que deben transportarla y manipularla. El etiquetado y/o codificación debe ser permanente.
- ✓ La muestra debe estar seca, en lo posible.
- ✓ La bolsa debe ser de un material resistente al transporte y manipulación. La muestra no debe ser lanzada por los aires cuando se está cambiando de lugar.
- ✓ Las muestras no deben exponerse al sol y la oxidación natural del medio ambiente, porque se contaminan y alteran rápidamente.
- ✓ Los operadores deben tener estas recomendaciones notificadas antes de manipular las muestras.
- ✓ La toma de muestra, su preparación, manipulación y conservación, son CLAVE, para asegurar resultados reproducibles en los siguientes procesos.



Ejercitando la memoria

Considerando la lectura del capítulo anterior sobre técnicas de muestreo, comparta tres consejos fundamentales a tener en cuenta a la hora de realizar un muestreo.

De las advertencias que informa el manual en este capítulo, para usted ¿cuál sería la más importante?



Técnicas de análisis químico

A continuación se informa de las distintas técnicas existentes para identificar y cuantificar los elementos químicos y óxidos mayores, que componen un depósito de relave.

Las técnicas para el análisis de químico disponibles son:

- Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)
- Fluorescencia de Rayos X (FRX)
- Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
- Activación Neutrónica (AAN)

Los laboratorios químicos chilenos cumplen con los estándares y protocolos necesarios para realizar la caracterización química de depósitos de relaves.

6.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

La *Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)* en flama, es a la fecha el análisis químico más ampliamente utilizada para determinar elementos metálicos y metaloides. Esta técnica tiene grandes ventajas y es de costo relativamente bajo, pudiendo aplicarse a una gran variedad de muestras (**Figura 22**).

VENTAJAS

- Puede analizar hasta 85 elementos en forma directa
- Sus límites de detección son inferiores a las partes por millón (ppm)
- Tiene relativamente pocas interferencias
- Su manejo es sencillo

DESVENTAJAS

- Por ser una técnica de absorción, sus curvas de calibración sólo son líneas con un corto rango de concentraciones

6.2 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) es muy utilizada para análisis elemental y químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción, así como en geoquímica, ciencia forense y arqueología (**Figura 22**).

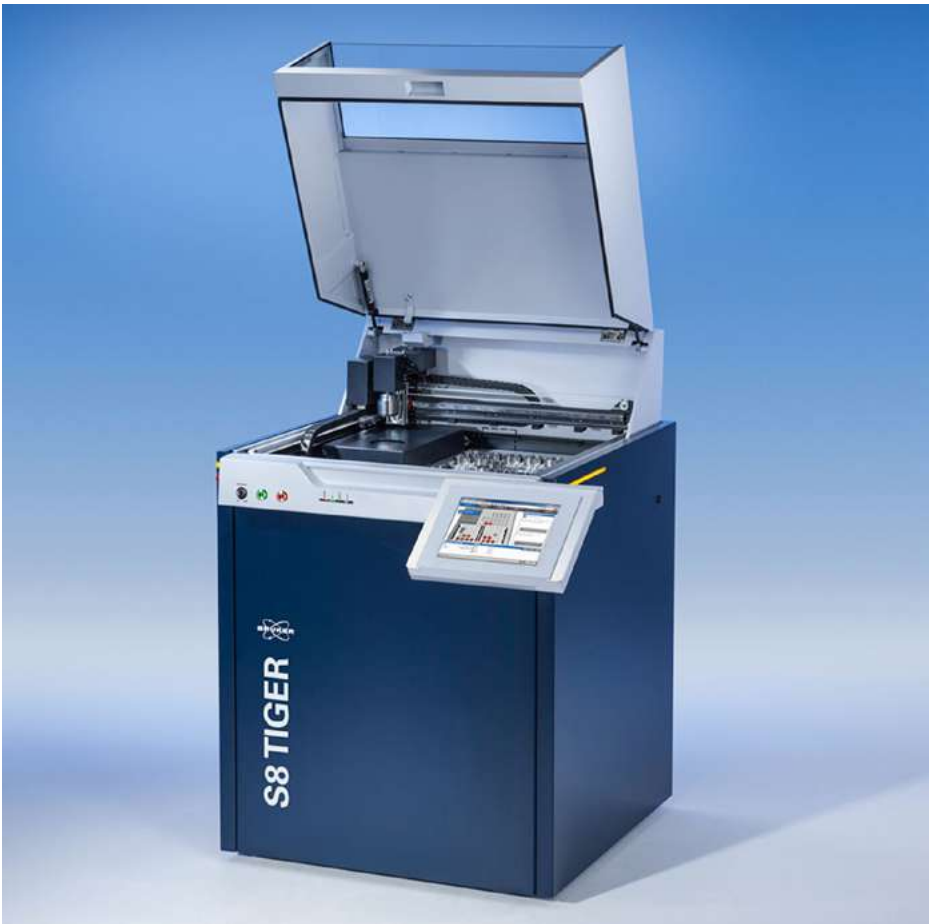


Figura 22: Espectrómetro Philips PW1606 de fluorescencia por rayos X con alimentador automático

VENTAJAS

- Rápido análisis cuantitativo de óxidos mayores y elementos como cobre, hierro, zinc, plomo y arsénico
- Detección y cuantificación confiable
- No destructivo
- Tratamiento previo de la muestra
- Análisis desde el nitrógeno hasta el uranio
- Análisis de muestras en polvo, sólidas o líquidas
- Mediciones en vacío o condiciones atmosféricas
- Gran tamaño de la cámara de análisis

DESVENTAJAS

- No es recomendable para elementos traza o elementos de valor en baja concentración (ejemplo, Tierras Raras)
- No es posible detectar oro bajo 5 ppm o elementos cuyas concentraciones sean menores a 10 ppm
- No detecta elementos muy ligeros

6.3

ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE

La Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) es altamente sensible y capaz de determinar en forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica. Se basa en el acoplamiento de un método para generar (plasma acoplado inductivamente), separar y detectar iones (espectrómetro de masas).



Figura 23: Equipo ICP-MS

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Bajos límites de detección para la mayoría de los elementos, detectando unas pocas ppb – ppt, lo que lo hace ideal para el análisis de elementos traza ● Análisis del mayor número de los elementos e isótopos de la tabla periódica, de manera simultánea en 5 minutos ● Bajo costo ● Resultados rápidos ● Gran variedad de aplicaciones en biología, física de materiales, medioambiente y geoquímica	● No se puede considerar para evaluar reservas

6.4

ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA

Debido a su exactitud y confiabilidad, el principio de Activación Neutrónica (AAN), generalmente es reconocido como el método de alta especialización.

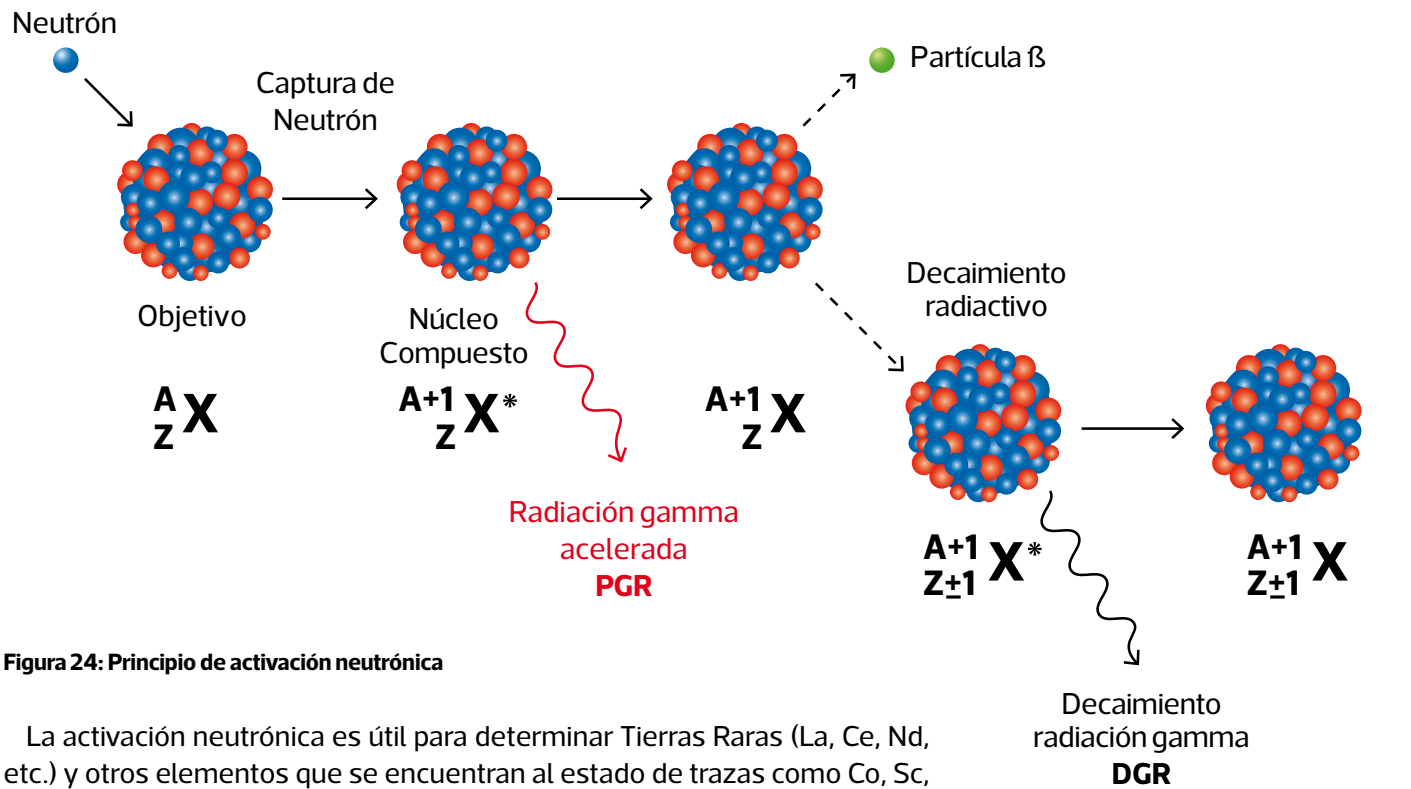


Figura 24: Principio de activación neutrónica

La activación neutrónica es útil para determinar Tierras Raras (La, Ce, Nd, etc.) y otros elementos que se encuentran al estado de trazas como Co, Sc, Hf, U, Th, entre otros. Permite, de igual manera, analizar varios elementos mayores, tales como Fe y Na.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Gran sensibilidad a elementos traza (ejemplo, Tierras Raras) ● Técnica no destructiva ● Detecta el total del elemento presente, independientemente de la oxidación, estado químico, o físico ● Detecta simultáneamente todos los elementos presentes ● No se requieren muestras muy grandes (del orden de los gramos) ● Alta precisión, reproducibilidad	● Requiere de una fuente de neutrones (reactor nuclear de investigación) ● En muestras diluidas, disminuye el límite de detección ● Alto costo

7

Técnicas de análisis mineralógico

Las técnicas de análisis mineralógico son variadas, poseen distintos alcances, algunas son de tipo cualitativas, otras cuantitativas o semicuantitativa. El uso de cada una de ellas, depende del objetivo del análisis. Estas técnicas se denominan de la siguiente forma:

- Microscopio de Luz Polarizada
- Difractometría de Rayos X
- Microscopia Electrónica de Barrido, Evaluación Cuantitativa de Materiales (QEMSCAN, MINSCAN, TESCAN)
- Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR)

A continuación se informa de los tipos de análisis mineralógicos existentes para la identificación y cuantificación de las especies mineralógicas que componen un depósito de relave, entregando la información necesaria para elegir el método de extracción más adecuado.

Las técnicas de análisis mineralógico desarrolladas en el país cumplen con los estándares y protocolos necesarios para realizar la caracterización mineralógica de depósitos de relaves.

7.1 MICROSCOPIO DE LUZ POLARIZADA

El *microscopio petrográfico* o de luz polarizada es un microscopio usado por personal experto, que reconoce las características ópticas de los minerales, que pueden ser identificados en una lámina delgada o briqueta, al microscopio (Figuras 25 y 26).



Figura 25: Microscopio de luz polarizada para identificación de minerales

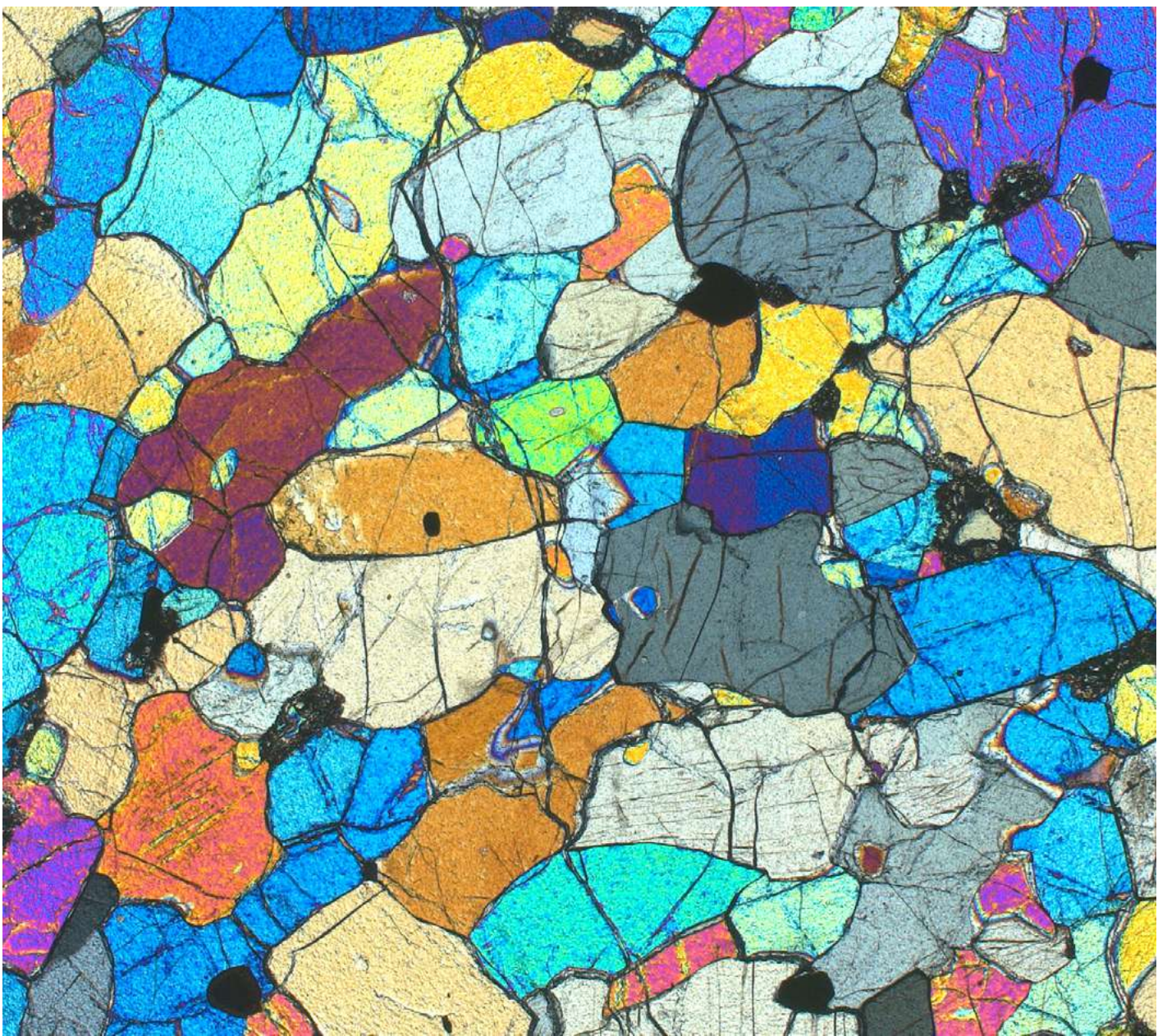


Figura 26: Corte de roca, mirada a través de microscopio de luz polarizada

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Bajo costo ● Información mineralógica detallada, con la posibilidad de tomar fotografías de las especies minerales que se desean destacar ● Identificación de minerales desconocidos, por el experto en mineralogía	● La revisión, identificación y recuento de las especies minerales en las muestras es muy lenta (una briqueta de concentrado por día, por ejemplo) ● Es necesaria una persona experta en reconocimiento mineral al microscopio, capaz de identificar especies minerales nuevas e identificación de procesos geológicos ● Información semicuantitativa

7.2

DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X

La Difractometría de Rayos X (DRX) corresponde a un método de alta tecnología, no destructivo, para el análisis de una amplia gama de materiales, incluso fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámica y semiconductora (Figura 27).



Figura 27: Equipo de difracción de rayos X

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Identificación de minerales polimorfos ● Distinción mineral del grupo de las arcillas cristalinas ● Análisis de amplia gama de materiales ● Bajo costo	● Análisis semicuantitativo para especies con presencia mayor al 1%. ● Si la cristalinidad de la muestra es imperfecta, no es posible identificar la especie mineralógica

7.3

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE MATERIALES

La Microscopía Electrónica de Barrido, Evaluación Cuantitativa de Materiales (QEMSCAN, MINS-CAN Y TESCAN) (Figura 28) es la herramienta de identificación y cuantificación mineralógica más completa empleada actualmente en la industria minera. Su tecnología flexible, ha sido empleada con éxito para materias primas diferentes, como metales preciosos y metales comunes, arenas minerales y minerales industriales.

EL equipo puede proporcionar:

- Análisis modal de granos (% peso)
- Mapas de partículas, indicando tamaños, asociaciones y texturas
- Análisis de texturas ocluidas y liberadas
- Ensayo químico por tamaños y por minerales, indicando la composición del mineral
- Capacidades de rastreo y búsqueda de elementos trazas en los minerales



Figura 28: Briqueta de mineral para análisis

El software de visualización permite analizar mapas de partículas y determinar:

- Promedio y rangos de tamaño de granos y partículas
- Las formas de cada especie mineral
- La proporción de las especies minerales presentes



Figura 29: Máquina MINSCAN

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Mayor exactitud respecto a la mineralogía de un depósito ● Obtención de la ley de cada mineral o elemento en forma exacta ● Análisis rápido ● Se pueden contar alrededor de 200.000 puntos en media hora, el equipo no se agota y puede hacerlo en forma continuada ● Es posible obtener y visualizar el promedio y rangos de tamaño de granos y partículas ● Información acerca de la textura de las partículas minerales (ocluidas o liberadas) ● Búsqueda de elementos trazas en los minerales	● No es capaz de identificar una especie nueva, es decir, si la especie no está incorporada al archivo no será identificada ● Alto costo

7.4 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA

La Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR) está basado en la espectrometría del infrarrojo (NIR) visible y zonas de onda corta del infrarrojo (350-2500 nm) con resultados inmediatos del instrumento en mediciones no destructivas (Figura 30).



Figura 30: Equipo portátil de espectroscopia infrarroja cercana

VENTAJAS	DESVENTAJAS
● Fácil manejo en terreno ● Identificación de minerales tipo arcillas y silicatos en general ● Entrega una visión rápida de las especies mineralógicas observadas en terreno ● Análisis no destructivo	● Bajo nivel de precisión ● No se puede usar para evaluar reservas, ni modelamiento de especies mineralógicas ● La información entregada por este equipo debe ser posteriormente confirmada con DRX o análisis QEMSCAN.

**Ejercitando la memoria**

¿Cuál es la herramienta de identificación mineralógica más completa que se emplea actualmente en la industria minera?	¿Cuál es el nombre del microscopio que reconoce las características óptimas de los minerales?	¿Qué método –no destructivo– analiza una amplia gama de materiales y es de bajo costo?



Análisis de datos químicos y mineralógicos de los depósitos de relaves

8.1 RELACIÓN ÓXIDOS MAYORES – MINERALOGÍA SILICATOS

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.

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 *microscopia tradicional*, DRX o QEMSCAN. La metodología utilizada se resume en los siguientes pasos:

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

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

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 : 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 31**, permite observar la comparación entre los Minerales de Arcilla que presentan el mayor porcentaje de alúmina (Al_2O_3), seguido de Sericita/Muscovita.

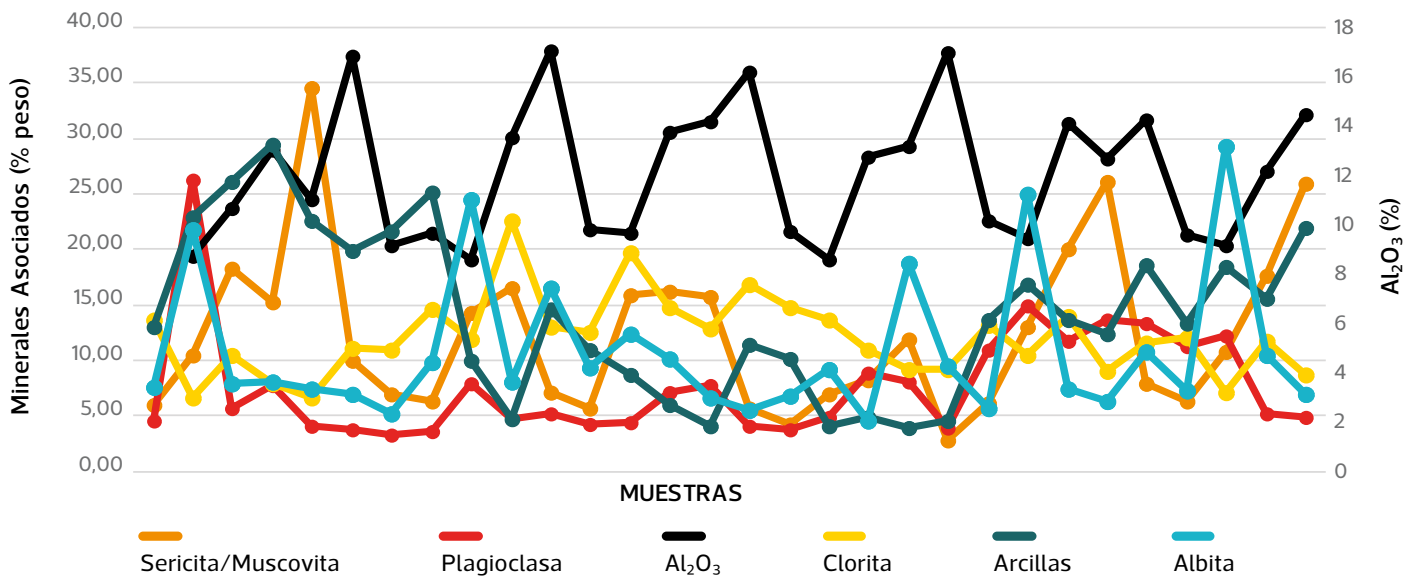


Figura 31: Distribución de Al_2O_3 y los minerales asociados

3. Análisis de correlación (R²)

Para confirmar las relaciones o ligazón entre mineral y óxido mayor, se sugiere realizar análisis geostatístico de correlación (R²) entre estos minerales y el óxido mayor, asumiendo como un coeficiente de correlación aceptable, cuando **R²>0,4**. *(>:mayor a)

La **Figura 32**, muestra una correlación estadística de **R²=0,086**, entre Al₂O₃ y Minerales de Arcilla, lo que corresponde a una correlación muy baja.

En cambio, la **Figura 33** presenta una correlación aceptable entre Al₂O₃ y Sericita/Muscovita, **R²= 0,540**.

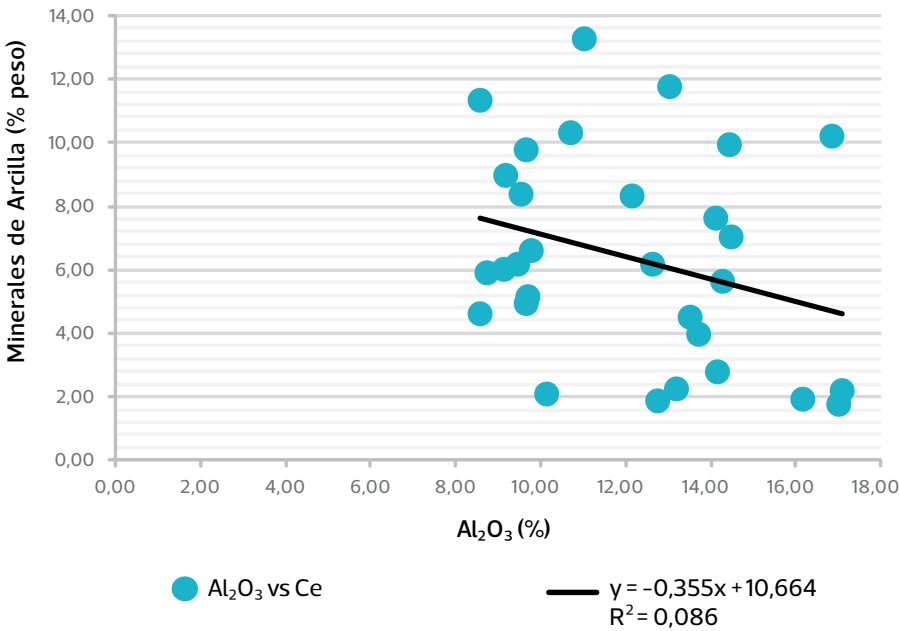


Figura 32: Correlación (R²) entre Al₂O₃ y Minerales de Arcillas

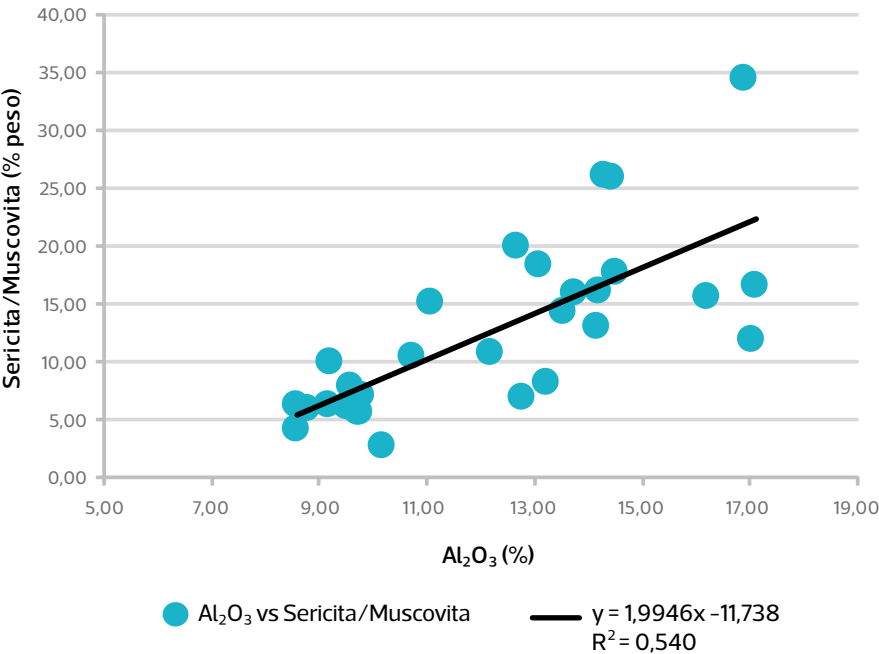


Figura 33: Correlación (R²) entre Al₂O₃ y Sericita/Muscovita

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* *LOGAS*, 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 (R²), que existen entre la alúmina (Al₂O₃) y los elementos traza identificados en el análisis químico.

A partir de las **Figuras 34 y 35**, se observa que las Tierras Raras, Ce y La, poseen una relación directa con el óxido mayor Al₂O₃.

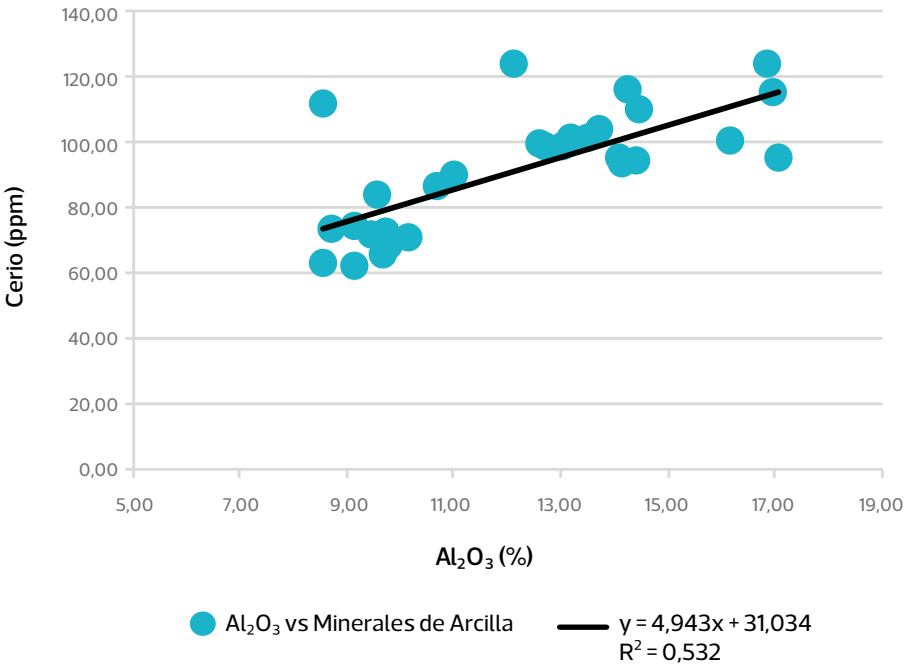


Figura 34: Correlación (R²) entre Al₂O₃ y Cerio

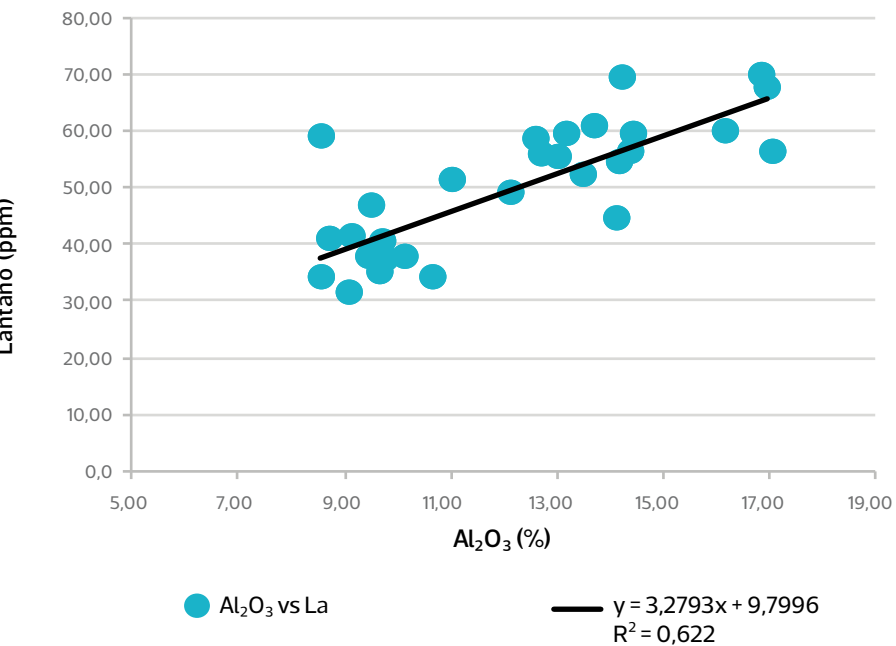


Figura 35: Correlación (R²) entre Al₂O₃ y Lantano

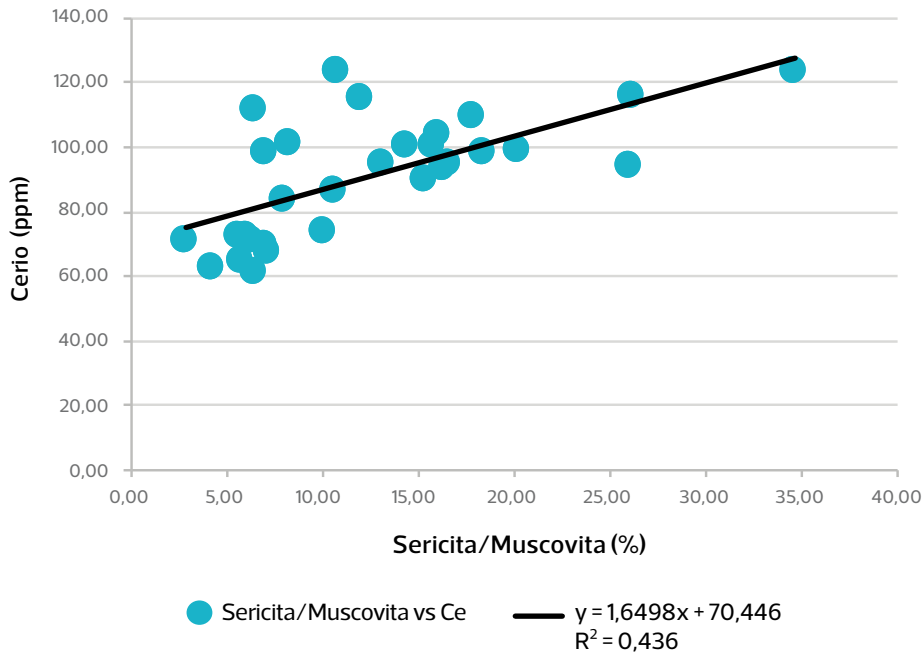
8.3

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 36**, muestra la



correlación que obtiene el mayor coeficiente, para el caso, el mineral Sericita/Muscovita con un valor de 0,436.

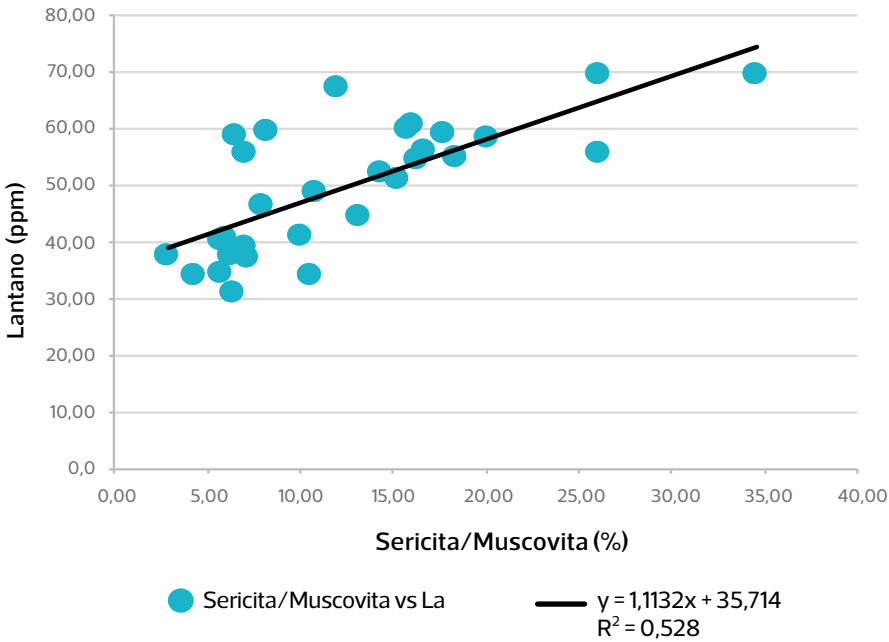
A partir de las **Figuras 36 y 37**, se observa que existe una asociación entre el filosilicato Sericita/Muscovita y las Tierras Raras Ce y La.

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, para encontrar las pruebas de lo que se quiere conocer.



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?

Glosario



Acrónimos:

CAMCHAL-BGR: Cámara Chileno Alemana de Comercio e Industria – Instituto de Geociencias y Recursos Naturales

COCHILCO: Comisión Chilena del Cobre

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción

JRI: Empresa de ingeniería chilena

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

RMM: Residuos Mineros Masivos

Definiciones generales:

Afinidad química: Las propiedades electrónicas por las que los elementos químicos son capaces de formar compuestos o tendencia de un átomo para combinarse.

Almacenamiento sub-estándar: Que no cumple con los protocolos establecidos para cuidar una muestra.

Anatasa: Mineral de titanio.

Antimonio: Elemento químico.

Berilio: Elemento químico.

Block Caving: Método de explotación aplicado a minería subterránea a cuerpos masivos mineralizados. Está clasificado dentro de los métodos de hundimiento.

Boratos: Compuesto químico.

Carbón de Coque: Compuesto químico, combustible con pocas impurezas y un alto contenido de carbono, generalmente hecho de carbón.

Cobalto: Elemento químico.

Cromo: Elemento químico.

Depósito de relave: Es un conjunto de material no consolidado, muros de contención (cuando corresponde) y laguna de aguas claras (dependiendo del tipo y si son activos), material que es producido en el proceso de flotación.

Detritos: Descomposición de una masa sólida en partículas.

Economía circular: Consiste en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y mejora el capital natural, optimiza el uso de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar una cantidad finita de existencias y unos flujos renovables.

Elementos trazas: Elemento químico presente en cantidades muy pequeñas (a nivel de partes por millón), generalmente asociado a las redes cristalinas de un compuesto químico.

Equiprobable: Situación en la teoría de la probabilidad, en que todos los resultados posibles son igual de probables.

Escoria de fundiciones: Residuo de alta temperatura proveniente de fundiciones, en procesos metalúrgicos de la industria del cobre.

Espato flúor: Constituido por fluoruro de calcio, compacto e incoloro o de colores variados (violáceo, rosado, amarillo o verde), debido a los óxidos o las impurezas.

Especies minerales silicatadas: Minerales cuyo componente principal es la sílice.

Fracción lamosa: Sólidos de granos más finos (menores a 2 micrones).

Franja Ferrífera: Es una franja longitudinal de de-

pósitos ferríferos que se extiende por más de 600 km entre las latitudes de 26º y 32ºS y que coincide con la posición de una faja de intrusivos del Albiaco (~110-100 Ma; Cretácico Inferior alto) y con la posición de la Zona de Falla de Atacama en su extremo sur.

Franjas metalogénicas: Área caracterizada por una agrupación de depósitos minerales o por uno o más tipos característicos de depósitos. Ejemplo: los Andes se caracterizan como una provincia metalogénica dominada por yacimientos cupríferos.

Galio: Elemento químico.

Genética: se refiere a las condiciones de temperatura, presión y profundidad que habían al momento de enfriarse el cuerpo mineralizado, que contiene los minerales y elementos.

Germanio: Elemento químico.

Grafito natural: Mineral suave, de color gris a negro y brillo metaloide, es estable, inodoro y no tóxico.

Indio: Elemento químico.

Lamas: Sólidos más finos dispuestos en la cubeta de depósito de un tranque de relave.

Magnesita: Mineral de magnesio.

Glosario



Magnesio: Elemento químico.

Método de muestreo: Método estandarizado para tomar muestras sin contaminación.

Microscopía tradicional: Corresponde al reconocimiento, recuento y descripción de los minerales en forma manual realizado por un observador experto en el reconocimiento de minerales.

Minerales petrogénicos: Minerales que forman una determinada roca, de acuerdo a condiciones físicas, químicas, de presión y temperatura comunes.

Mineralogía: Ciencia que estudia las propiedades físicas de los minerales, sus componentes químicos y sus características simétricas. Corresponde a una rama de la Geología.

Metales del grupo Platino: Grupo de elementos químicos tales como: platino, paladio, osmio, iridio, rodio.

Niobio: Elemento químico.

Roca de Fosfato: Con abundante fosfato (PO_4).

Ocurrencia de minerales: Es una concentración anómala de un mineral que se considera valioso por alguien en alguna parte o que es de interés específico para la ciencia.

Óxidos: Combinación que resulta de la unión de un

elemento metálico o no metálico con el oxígeno. Oxidación provocada por la humedad o el agua.

Óxidos Mayores: Se denominan Mayores porque están presentes en altas concentraciones y forman parte de la mayoría de los silicatos que forman una roca.

Ripios de lixiviación: Material que queda como residuo del mineral una vez que todo el cobre ha sido lixiviado, el cual es desechado en áreas especiales o botaderos de ripio. Corresponde a la cola del proceso de lixiviación.

Redes cristalinas: Corresponde a la estructura cristalina que es la forma sólida de cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas e iones.

Relave: Sólido, finamente molido (roca molida y agua), que es producido en operaciones mineras.

Residuo cero: Característica de procesos productivos que no generan residuos.

Rutilo: Mineral de titanio.

Sericita/muscovita: Aluminio-silicato común en las rocas provenientes de yacimientos mineralizados.

Silicio Metálico: Se puede obtener mediante procesos de separación de los silicatos y el dióxido de silicio. Al formar aleaciones con el aluminio, aporta propiedades mecánicas, dureza y la capacidad para ser conformado por moldeo.

Software IOGAS: Software que realiza correlaciones estadísticas.

Sulfuros: Combinación de azufre con otro elemento químico.

Técnicas FRX: Esta técnica consiste en la emisión de Rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado, al ser "bombardeado" con Rayos X.

Técnica QEMSCAN: Acrónimo inglés de Evaluación Cuantitativa de Materiales mediante Microscopio Electrónico de Barrido. Poderosa herramienta de procesos mineralógicos empleada en la industria minera.

Tierras Raras: Nombre común de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio).

Tungsteno: Elemento químico.

Yacimiento fresco: Que está siendo explotado.

Yacimiento madre: Yacimiento original.

Zonas lixiviadas: Zonas abundantes en óxidos de hierro.

Fórmulas químicas:

Al_2O_3 : Óxido de aluminio
 CaO : Óxido de calcio
 Fe_2O_3 : Óxido de hierro
 K_2O : Óxido de potasio
 MgO : Óxido de magnesio

MnO : Óxido de manganeso
 Na_2O : Óxido de sodio
 P_2O_5 : Óxido de fósforo
 SiO_2 : Óxido de silicio
 TiO_2 : Óxido de titanio

Siglas

ppm: partes por millón

ppb: partes por billón

ppt: partes por trillón

Bibliografía



Alfaro, M. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Santiago de Chile.

Aracena, I. (2018). Informe *Estado del Arte de sondajes y caracterización. Investigación y desarrollo para la recuperación de elementos de valor desde relaves*. CORFO. Santiago de Chile.

Bergera, G., Jarén, C., Arazuri, S., Arana, I. (2015). *Instrumentación para la Espectroscopía de infrarrojo cercano*. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. España.

Boart Longyear Ltda *Manual para Terreno Productos Diamantados*. Utah, Estados Unidos.

Díaz, R. (2017). *Ventajas y desventajas del análisis por ICP – MS de metales pesados en muestras biológicas*. Boletín Institucional. Instituto Nacional de Salud. Pp. 23(7-8):54-9. Perú.

Empresa de perforaciones Geotron Chile Ltda. (2017). *Muestreo del tranque Cauquenes*. Chile.

European Comission. (2014). *Report on Critical Raw Materials for The EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*. Unión Europea.

Fritis, V., Griem, W., Riveros, K. (2016). *Caracterización geológica y metalogénica del prospecto minero "Soesmi 1 al 32", Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile*. XXXIV UNESCO-SEG-SGA Latin American Metallogeny Course. Copiapó. Chile.

Geotec Boyles Bros S.A. (2006). *Curso Sistema Perforación Aire Reverso*. Recursos Humanos. Capacitación. Quilicura, Chile.

Hole product, LLC. (2012). *Auger Tools*. United States.

Maksaev, V. (2001). *Metallogenesis of Chile*. Class notes, Department of Geology, University of Chile. Chile.

Mobile Drill, LLC. (2015). *Hollow stem augers and cutterhead*. United States.

Moldoveanu, G., Papangelakis, V. (2014). *Recovery of Rare Earth Elements from Clay Minerals*. 1st European Rare Earth Resources Conference. Toronto, Canada.

Nesse, W. (1991). *Optical Mineralogy*. 2° Edition, Oxford University Press. UK.

Rocha, E. (2000). *Principios Básicos de Espectroscopia*. Editorial UACH. México Pp. 123-203.

SERNAGEOMIN. (2016). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. En: <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>

Skoog, D.A., James, Holler F. James. (1998). *Principios de análisis instrumental*. 5° ed. Ed. McGraw-Hill. Pp. 219-239.

Shuter, E y Teasdale, W. (1989). *Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey. Application of drilling, coring, and sampling techniques to test holes and Wells. Book 2. Collection of Environmental Data*. United States Government Printing Office, Washington. (PDF)

Taylor, H. (2001). *Inductively Coupled Plasm-Mass Spectrometry. Practices and Techniques*. Academic Press. San Diego, USA.

Triviño, T. (2018). *Metodología para caracterización de génesis y distribución de elementos traza en depósitos de relaves chilenos*. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.

Yepes, V. (2014). *Maquinaria para sondeos y perforaciones*. Apuntes de la Universitat Politècnica de València. España.

Índice de Figuras

Figura 1: Composición del Relave. Fuente propia.

Figura 2: Tranque de Relave. Fuente: Uso libre, tomada y modificada de GARD Guide (Organismo dependiente de INAP)

Figura 3: Franja Ferrífera de Chile. Fuente: Triviño, 2018.

Figura 4: Sondeo a percusión con cable. Fuente: Yepes, 2014.

Figura 5: Izq.: Maquinaria Sondaje Aire Reverso. **Der.:** Muestras obtenidas mediante sondaje de Aire Reverso. Fuente: BOART LONGYEAR.

Figura 6: Sistema de perforación de Aire Reverso. Fuente: Geotec, 2005.

Figura 7: Maquinaria Sondaje de Diamantina. Fuente: BOART LONGYEAR.

Figura 8: Muestras obtenidas con sondaje de diamantina. Fuente: BOART LONGYEAR.

Figura 9: Sondaje Manual tipo barreno: Uso y partes que lo conforman. Fuente propia.

Figura 10: Muestras obtenidas con sonda sónica. Fuente: BOART LONGYEAR.

Figura 11: Maquinaria Fugro Sondaje CPT-FRX. Fuente propia.

Figura 12: Máquina Auger Drilling montada en oruga. Fuente: GEOTRON.

Figura 13: Muestreador de canaleta correctamente diseñada. Fuente propia.

Figura 14: Muestreo por canaleta en afloramiento: Fuente: Fotografía de Ángel Lambert.

Figura 15: Muestreo puntual de acuerdo a una malla previamente establecida. Fuente propia.

Figura 16: Esquema de una veta y su dirección. Fuente: Griem y Riveros, 2016.

Figura 17: Veta mineralizada para muestreo por detritos. Fuente: Fotografía de Ángel Lambert.

Figura 18: Muestreo de zanja. Fuente propia.

Figura 19: Cancha de acopio. Fuente: ENAMI.

Figura 20: Muestreo mediante pozos. Pozos neolíticos (5200 AC) de la mina de sílex de Casa Montero (Madrid, España). Fuente: Cortesía del Proyecto Casa Montero, CSIC.

Figura 21: Muestreo de marinas. Fuente: Alfaro, 2002.

Figura 22: Espectrómetro Philips PW1606 de fluorescencia por rayos X con alimentador automático. Fuente: BRUKER (SAX Soluciones Analíticas).

Figura 23: Equipo ICP-MS. Fuente: NanoMedFab.

Figura 24: Principio de activación neutrónica. Fuente: CChEN.

Figura 25: Microscopio de luz polarizada para identificación de minerales. Fuente: ZEISS.

Figura 26: Corte de roca, mirada a través de microscopio de luz polarizada. Fuente: ZEISS.

Figura 27: Equipo de difracción de rayos X. Fuente: BRUKER (SAX Soluciones Analíticas).

Figura 28: Briqueta de mineral para análisis. Fuente: ZEISS.

Figura 29: Máquina MINSCAN. Fuente: ZEISS.

Figura 30: Equipo portátil de espectroscopia infrarroja cercana. Fuente: BRUKER (SAX Soluciones Analíticas).

Figura 31: Distribución de Al_2O_3 y los minerales asociados. Fuente propia.

Figura 32: Correlación (R^2) entre Al_2O_3 y Minerales de Arcillas. Fuente propia.

Figura 33: Correlación (R^2) entre Al_2O_3 y Sericita/Muscovita. Fuente propia.

Figura 34: Correlación (R^2) entre Al_2O_3 y Cerio. Fuente propia.

Figura 35: Correlación (R^2) entre Al_2O_3 y Lantano. Fuente propia.

Figura 36: Correlación (R^2) entre Sericita/Muscovita y Cerio. Fuente propia.

Figura 37: Correlación (R^2) entre Sericita/Muscovita y Lantano. Fuente propia.

Propiedad de:

Notas:

Proyecto apoyado por

