JUAN HERRERA HERBERT

Introducción a la Minería. (Vol. III) La exploración e investigación minera.

Madrid - 2017

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía

www.minas.upm.es

ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.

Foto de portada: “a new chapter in the story of Rio Tinto” <https://miningandconstruction.com> (2014)

DOI: 10.20868/UPM.book.63399

Archivo Digital de UPM: <http://oa.upm.es/63399/>

Copyright © 2017. Todos los derechos reservados

Juan Herrera Herbert
juan.herrera@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid (Technical University of Madrid)
E.T.S. de Ingenieros de Minas y Energía (H.T. School of Mines and Energy)
Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras (Mining Technologies Innovation Lab)

Calle Rios Rosas 21
28003 Madrid (España)

Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner. Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.

Contenido

1.	LA EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN MINERA	1
1.1.	INTRODUCCIÓN Y KEY CONCEPTS	1
1.2.	CONCEPTO DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN MINERA.....	1
1.3.	OBJETIVOS DE LA EXPLORACIÓN Y DE LA INVESTIGACIÓN MINERAS	3
1.4.	LA PROSPECCIÓN Y LA EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA	5
1.5.	“GREENFIELD EXPLORATION”	7
1.6.	“BROWNFIELD EXPLORATION”	7
1.7.	DISTRIBUCIÓN DE LOS TRABAJOS EN ETAPAS	8
1.8.	LA EXPLORACIÓN MINERA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE	9
2.	PROCESOS Y ACTIVIDADES	11
2.1.	PROCESOS Y ACTIVIDADES.....	11
2.2.	ELECCIÓN DE LAS TÁCTICAS Y ESTRATEGIAS MÁS ADECUADAS	17
2.3.	MEDIOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS ACTIVIDADES DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN	21
2.4.	TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES	23
2.5.	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN	23
2.6.	TELEDETECCIÓN Y GIS.....	24
2.7.	GEOLOGÍA	25
2.8.	GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA	26
2.9.	CALICATAS.....	27
2.10.	SONDEOS DE EXPLORACIÓN.....	28
2.11.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	28
3.	LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN	31
3.1.	FINALIDAD DE LOS SONDEOS.....	31
3.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS SONDEOS	34
3.3.	DIFICULTADES LOGÍSTICAS DE UNA CAMPAÑA DE SONDEOS.....	34
3.4.	PERFORACIÓN DESDE LA SUPERFICIE.....	37
3.5.	PERFORACIÓN SUBTERRÁNEA	37
3.6.	MALLAS DE SONDEOS	39
3.7.	MUESTRAS PROCEDENTES DE SONDEOS	40
3.7.1.	Recolección de detritus secos.....	40
3.7.2.	Reconocimiento de testigos de roca	41
3.7.3.	Muestreo y ensayo de testigos.....	44
4.	SISTEMAS DE EVALUACIÓN Y CODIFICACIÓN DE YACIMIENTOS	47
4.1.	KEY CONCEPTS	47
5.	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RESERVAS	53
5.1.	KEY CONCEPTS	53
5.2.	MÉTODOS BASADOS EN ESTADÍSTICA CLÁSICA	53
5.3.	MÉTODOS CONVENCIONALES	54
5.4.	MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS	55
5.5.	SEMI-VARIOGRAMAS	56
5.6.	KRIGING.....	57
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. LA EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN MINERA

1.1. INTRODUCCIÓN Y KEY CONCEPTS

Para el desarrollo de cualquier proyecto minero son necesarias muchas tareas previas para llegar a poder definir las características del yacimiento a explotar, incluyendo como parámetro fundamental la calidad del mineral y su ubicación espacial. En este aspecto es importante entender “calidad” de un mineral como la cantidad de elementos aprovechables económicamente dentro de la matriz rocosa, además de sus características geotécnicas, aspectos que influirán en gran medida en la selección del método de explotación.

De este modo, es clave conocer tanto la forma del yacimiento como la concentración de mineral en el macizo rocoso, debiendo definir la ley de mineral en cada uno de los puntos del yacimiento con la mayor precisión posible.

1.2. CONCEPTO DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN MINERA

Prospección es la búsqueda de anomalías minerales. Se prospecta una región para encontrar depósitos de minerales.

Exploración: se explora un depósito mineral para definir su explotabilidad. Por tanto, las actividades de exploración son el conjunto de actividades orientadas al establecimiento y determinación de las características de un depósito mineral a través de estudios geológicos que utilizan distintas tecnologías y metodologías (geofísica, geoquímica, etc.). El resultado final debe poder definir de manera conceptual cada una de las fases necesarias para la extracción de los recursos minerales investigados.

La exploración es precedida de las actividades de Prospección y seguida de las actividades de Ingeniería, Planificación de Mina y Desarrollo.

Debe permitir:

- Reemplazar las reservas de los depósitos y yacimientos actualmente en explotación y producción.
- Incrementar las reservas (activos mineros) de la compañía en términos reales.
- Encontrar nuevos yacimientos en respuesta a los cambios percibidos en los mercados de materias primas.

La exploración y la investigación minera, llevadas con una rigurosa priorización de los proyectos y un fuerte enfoque comercial, están demostrando ser una de las formas más efectivas de valorizar, mantener e incrementar las carteras de activos mineros.

La definición, planificación y gestión de un programa de exploración con una aceptable garantía de éxito es una compleja labor que requiere:

- Una clara definición de los objetivos empresariales.
- Un intenso trabajo de perfilado de las estrategias y de las tácticas más adecuadas en cada caso.
- De la selección de los equipos de trabajo idóneos, de la planificación y de la provisión de los presupuestos necesarios.

Es, además, una labor que exige su propio ritmo de trabajo, que será totalmente distinto del de las restantes actividades relacionadas con la industria minera y que es la clave para garantizar la continuidad de la actividad extractiva. A pesar de los enormes adelantos técnicos, el secreto de una correcta implementación, manteniendo un coste económico moderado, radica en la adecuada combinación de las técnicas más modernas con los métodos y hábitos tradicionales.

Pero más importante, si cabe, que esa evolución tecnológica que han experimentado las actividades de exploración, es la evolución que la propia sociedad ha impuesto, convirtiéndola en la actividad clave para ordenar y favorecer el aprovechamiento racional de los recursos no renovables, respetando el medio ambiente y los demás recursos naturales del entorno.

La exploración minera es, al mismo tiempo, una actividad económica en sí misma y una forma de inversión, de tal manera que se lleva a cabo con el objetivo de encontrar un yacimiento que compense las fuertes cantidades invertidas y el alto riesgo que es necesario asumir y que es inherente a las propias actividades de búsqueda.

Concepto de yacimiento (ore deposit)

Es la presencia de minerales o de metales en una concentración suficientemente alta como para ser aprovechable y explotable por un proceso minero utilizando las tecnologías actuales y en las condiciones económicas actuales.

1.3. OBJETIVOS DE LA EXPLORACIÓN Y DE LA INVESTIGACIÓN MINERAS

El principal objetivo de la **prospección o exploración minera** es la localización de nuevos recursos minerales y reservas que permitan mantener la actividad minera mediante la reposición de las reservas extraídas o, en su caso, incrementar el beneficio económico generado por la mayor rentabilidad de los activos mineros.

Por su parte, el objetivo de la **investigación minera** y de la evaluación posterior de un yacimiento localizado y dimensionado en la anterior etapa de exploración, será suministrar los datos objetivos y las informaciones necesarias para obtener un modelo completo y coherente de la realidad geológica que se está estudiando.

Figura nº 1
Reducción del riesgo a medida que se incrementa el conocimiento.

Por ello, las actividades de exploración e investigación deberán garantizar el desarrollo de los siguientes cuatro grupos de actividades clave:

1. En primer lugar, la geología minera debe suministrar los datos necesarios para visualizar el yacimiento en un modelo o inventario de:
 - La cantidad de mineral
 - La calidad del mismo y
 - La distribución espacial
2. El segundo grupo de informaciones clave que deberá aportar es el mejor conocimiento de las diferentes clases de rocas para ayudar a resolver los problemas operativos de:
 - Geotecnia
 - Hidrogeología
 - Vertederos
 - Perforación o ripado, sistema de arranque.
 - Sistema de carga
 - Sistema de transporte
 - Requisitos para la restauración y "remediación" posterior.
3. El tercer aspecto clave es el conocimiento

de las características del marco ambiental y socioeconómico que rodean al emplazamiento del proyecto, con el fin de determinar la forma en que pueden actuar o condicionar su desarrollo.

4. Finalmente, el cuarto objetivo de la exploración, pero que por su importancia debería ser el primero, es la **Evaluación**:

- De las leyes en relación con los precios
- De un inventario codificado de reservas y recursos por niveles o alturas o por la situación de materiales estériles.
- Establecimiento de un nivel muy claro de medida de la calidad como puede ser la ley o contenido metálico, la termia para los combustibles, la granulometría para los áridos granulares o una característica física como la blancura para los caolines.
- De las implicaciones económicas en cada caso.

Desde el punto de vista de la buena práctica minera, esta labor de evaluación debe llevarse a cabo de una forma permanente de tal manera a establecer los cambios y modificaciones oportunos en cada momento.

El concepto dinámico de la minería moderna obliga, necesariamente, a llevar una investigación operativa adelantada, continuada y permanente de todas las áreas que van a ser, posiblemente, objeto de la futura explotación. En un puro sentido económico entre un 3 y 5% del valor anual de las ventas debería destinarse a la recuperación de las reservas extraídas en el año en la explotación, de tal modo que se sustituyan las agotadas por otras nuevas, bien en la misma área o cuenca minera, bien en otras zonas o en otras sustancias minerales.

La evaluación de las reservas se llevará a cabo mediante la cubicación de todos los datos de calidades, cantidades y de su situación espacial, que serán procesadas en una forma mecanizada y con un buen conocimiento del nivel de riesgo, de tal modo que a un mayor conocimiento se obtendrá un menor riesgo.

Por ello, se deberán diferenciar:

- Una fase de carácter más geológico y de primera estimación (Appraisal)
- Una segunda fase más minera de Estudio de Viabilidad (Feasibility), que requiere un buen conocimiento de los costes y rendimientos.

1.4. LA PROSPECCIÓN Y LA EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA

Se distinguen cuatro etapas de trabajo en una mina, denominadas también fases en la vida de una mina:

- Prospección
- Exploración
- Desarrollo
- Explotación

La Prospección es la etapa en la que se buscan minerales aprovechables en una zona determinada. Las técnicas que se usan son las basadas en estudios geológicos, o bien mediante técnicas basadas en geofísica, geoquímica, etc. En esta fase se determinan anomalías del terreno que justifiquen estudios posteriores de mayor precisión.

La Exploración será aquella etapa en la que se realice un dimensionamiento del depósito mineral de modo que se definan tanto la forma y contenido de mineral como el valor de dicho depósito, entendiendo como “valor” a la cantidad de mineral que se puede extraer de manera rentable. El consecuente valor monetario siempre estará definido por el precio de cotización del mineral en el momento de su puesta en el Mercado.

Para llegar al conocimiento de las características del depósito mineral habrá que emplear herramientas y métodos de ubicación de yacimientos y cálculo de leyes a partir de una serie discreta de muestras, por medio de análisis geo-estadísticos.

La etapa de Desarrollo será aquella en la que se definen cada uno de los elementos que serán necesarios para la extracción de mineral y su disposición en el lugar más adecuado, como por ejemplo, infraestructuras necesarias, planta de tratamiento, etc. de modo que no interfieran en fases posteriores.

La culminación del proceso de vida de una Mina será la etapa de Explotación, en la cual se establecen la sucesión de trabajos necesarios para alcanzar el depósito mineral, la secuencia necesaria y los métodos de extracción del mismo.

La exploración y la prospección son fases estrechamente ligadas y suelen combinarse entre sí. En estas fases tendrían un mayor peso las técnicas geológicas. El desarrollo y la explotación son las fases, en las que son necesarios unos conocimientos más relacionados con la Ingeniería Minera.

Fase	Procedimiento	Intervalo de tiempo
1) Prospección	Búsqueda de menas Métodos de prospección: Directo - física, geología. Indirecto - geofísica, geoquímica. Localización de lugares favorables: Mapas, publicaciones, minas antiguas y presentes. Aire: Fotos aéreas, imágenes de satélite, métodos geofísicos. Superficie: Métodos geofísicos y geológicos. Anomalía - Análisis - Evaluación.	1-3 años
2) Exploración	Dimensión y valor del depósito mineral Muestreo: Excavación, roza, sondeo. Cubicación- cálculo de leyes. Evaluación.	2-5 años
3) Desarrollo	Depósito mineral abierto para la producción 1. Estudio del impacto de minería al medio ambiente 2. Infraestructura 3. Planta	2-5 años

	4. Explotación	
4) Explotación	Producción de las menas Factores que influyen en la selección del método de extracción son geología, geografía, economía, medio ambiente, aspecto social, seguridad.	10-30 años

Fuente: HARTMAN (1987)

En el campo de la determinación de las propiedades y características de los yacimientos minerales, hay conceptos que, en ocasiones, se usan indistintamente:

- Investigación Minera
- Prospección Minera
- Exploración Minera

Algunos autores diferencian exploración de prospección en lo que concierne su objetivo, y, a partir de éste, el principio de trabajo aplicado es diferente.

El objetivo de la prospección es el reconocimiento general de un yacimiento mineral mientras que la exploración está enfocada en un reconocimiento detallado del depósito mineral. El primer objetivo de la prospección es la localización de una anomalía geológica con propiedades potenciales de definirse como un potencial depósito mineral, un objetivo común de la prospección y de la exploración es la reducción del área de investigación. Para que un proceso de prospección tenga éxito se tiene que dar alguna de las tres condiciones siguientes:

- Que se busque algún indicio donde nadie haya buscado antes
- Que se investiguen indicios que anteriormente hayan pasado desapercibidos.
- En el caso de zonas mineralizadas conocidas, que se analicen nuevas zonas rodeando a éstas.

Para llegar a establecer un buen proyecto minero de explotación es necesario la correcta definición del depósito mineral por medio de un exhaustivo proceso de prospección. Estos datos obtenidos serán los que servirán de base a la interpretación geológica del macizo rocoso, cuya exactitud estará cuestionada cuanto mayor sea la incertidumbre en los datos obtenidos. Por este motivo, durante la fase de prospección muchos de los datos obtenidos serán desechados tras confirmar la ausencia de materiales valorizables en su zona de influencia.

Solo un pequeño número de las prospecciones realizadas serán apropiadas para la determinación de las características del yacimiento y solo unas pocas de éstas serán las que alcanzarán la fase del estudio de viabilidad para llegar a definir el proyecto minero de extracción.

En la "Curva del Proceso de Exploración" se muestran diferentes casos de exploración con diferente resultado. Los casos "A" y "C" son exitosos, con la diferencia de que la "calidad" de los estudios realizados en "C" es mayor que en "A", puesto que se descartan menor número de prospecciones de una fase a otra en la etapa de Exploración. La "calidad" será función de los datos previos obtenidos.

En cambio, el caso de la exploración "B" es el caso más típico, en el que un gran número de prospecciones se van descartando a medida que se suceden las etapas del proceso de exploración, hasta que llega un momento en el que se descartan todas las prospecciones realizadas. Este sería el caso en el que se abandona el estudio, porque los resultados obtenidos no superan las diferentes fases, sin llegar a culminar en un proyecto de explotación.

1.5. "GREENFIELD EXPLORATION"

La exploración "Greenfield" supone el descubrimiento de depósitos en nuevas ubicaciones geográficas y/o la diversificación de la cartera de productos de una compañía.

En éstos casos, cuando tras una exploración de campo, un depósito cumple los criterios para ser evaluado como un "descubrimiento", en las grandes compañías el descubrimiento se transfiere al grupo o división de productos apropiado (es decir, aluminio, cobre, diamantes y minerales, energía y mineral de hierro). El grupo de productos será el encargado de llevar a cabo estudios más detallados de evaluación y viabilidad antes de tomar una decisión sobre si desarrollar el depósito.

1.6. "BROWNFIELD EXPLORATION"

La exploración "Brownfield" está orientada al crecimiento o, al menos el sostenimiento de las operaciones existentes. Se capitaliza en proyectos en los que ya se ha hecho una inversión significativa, es decir, fundamentalmente zonas donde ya existe un proyecto minero en marcha. La característica fundamental es que los costos son más bajos y el acceso es más simple que la exploración de campo en zonas no exploradas, ya que éste tipo de exploración generalmente se lleva a cabo en terrenos que ya posee la compañía promotora.

Como los recursos de primera categoría (Tier 1) se encuentran a menudo en grupos, esta es otra razón más para que se desarrollen operación de exploración "brownfield" y es, además, una magnífica oportunidad de crear valor mediante la exploración.

Habitualmente, la exploración y posterior evaluación de los emplazamientos "brownfield" es llevada a cabo por las correspondientes unidades de negocio, con el correspondiente apoyo y respaldo de las unidades centrales de las compañías.

1.7. DISTRIBUCIÓN DE LOS TRABAJOS EN ETAPAS

La evolución de un proyecto desde los ensayos iniciales hasta la construcción y puesta en marcha de una mina puede durar de diez a veinte años, lo que implica cubrir una serie de etapas y de estudio que deben conducir a lograr la aprobación y la posterior implementación de las inversiones.

En términos generales, el proceso de exploración se puede dividir en cinco etapas. El número de oportunidades de poder avanzar a la siguiente etapa disminuye progresivamente a medida que se avanza en el proceso de investigación y evaluación del potencial del yacimiento. Dichas etapas son las siguientes:

Selección del área: decidir sobre dónde explorar

El trabajo comienza en una etapa de gabinete en la que el equipo de Exploración realiza evaluaciones de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos de distintas procedencias para encontrar aquellas áreas que tengan mayor potencial de contener un cuerpo de mineral. En esta etapa también se incluye la identificación de aquellas cuestiones relacionadas con la salud, la seguridad, el medio ambiente y las comunidades, así como los riesgos técnicos o políticos. El equipo realiza a menudo una o varias visitas iniciales a la zona.

Identificación del objetivo: determinar si un depósito puede existir

La generación de cartografía y el levantamiento en campo se realizan dentro de un área seleccionada. En ésta etapa el equipo determina si existe un objetivo que represente el depósito mineral que buscan. Es también el momento en que se inician los encuentros y reuniones con las comunidades locales para obtener acceso temporal a la tierra, y es también el momento de empezar a evaluar las oportunidades de abastecimiento desde los mercados locales y el posible empleo.

Inversión en la exploración

El gasto global en exploración mineral responde a los cambios en el ciclo de los productos básicos. En el momento actual, es importante examinar cada oportunidad individualmente para decidir el nivel de inversión en exploración que se llevará a cabo. El tamaño y envergadura de la inversión en exploración está determinado por la calidad de la oportunidad y por el riesgo del proyecto, así como por la evaluación que cada empresa hace de las perspectivas a largo plazo para la commodity en cuestión. La división del gasto anual en exploración, por lo tanto, no está predeterminada ni está necesariamente en línea con los beneficios de la comercialización de un determinado commodity.

Pruebas de objetivos: evaluación de la naturaleza de la mineralización

En ésta etapa el equipo de exploración realiza la primera evaluación sub-superficial de aquellos puntos identificados como de mejores perspectivas, lo que se hace mediante una campaña de perforación limitada y, en su caso, la excavación de zanjas, calicatas y/o trincheras. En función de cada caso, en esta etapa es posible que se pueda empezar a recopilar datos de base y de referencia ambientales y sociales.

Delineación y delimitación de recursos: determinación del tamaño del depósito, ley y características mineralógicas (metalurgia y mineralurgia)

Si los resultados de la perforación inicial son alentadores, se realizan entonces nuevas campañas de perforaciones adicionales para estimar la ley de la mineralización. El equipo trabaja cada vez más estrechamente con las partes interesadas locales (stakeholders) para analizar los asuntos ambientales y de la comunidad, e inicia estudios de línea de base en el caso de que éstos no se hayan comenzado previamente.

Evaluación de recursos: juzgar si un depósito será económicamente interesante

El equipo de investigación lleva a cabo una investigación más detallada del depósito en esta etapa. El objetivo es decidir si será económicamente interesante de desarrollar. Esto implica más estudios en forma de nuevas campañas de perforación, estudios y ensayos metalúrgicos y de ingeniería y

análisis económicos. Después de esta etapa, denominada Estudio Conceptual, se debe tener un

Imagen 1

(Fuente: Fact sheet on Exploration. Rio Tinto Ltd)

conocimiento preciso del potencial minero y económico del yacimiento.

1.8. LA EXPLORACIÓN MINERA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Un importante número de proyectos mineros duran 40 años o más desde el descubrimiento de minerales hasta el cierre, lo que representa la ejecución de inversiones de largo plazo y a gran escala en capital fijo. Este tipo de compromisos a largo plazo brindan oportunidades para planificar y ejecutar proyectos de tal manera que aporten contribuciones sostenibles al bienestar social, la administración ambiental y la prosperidad económica.

El objetivo principal de las actividades de Exploración debe ser encontrar recursos de bajo coste y larga vida. Estos descubrimientos pueden convertirse en el catalizador de la diversificación económica local, el desarrollo de habilidades en la fuerza de trabajo local y mejoras en la infraestructura.

Cada uno de los países y regiones donde se llevan a cabo exploraciones mineras tiene diferentes culturas, pueblos, leyes y expectativas. Los equipos de exploración son, en muchas ocasiones, el primer contacto de las compañías mineras con las personas que pueden convertirse en vecinos durante las siguientes generaciones. El respeto a la diversidad de las comunidades locales y el involucrarse de una manera directa y personal, y a la vez, adaptada a las especificidades de cada región, aldea o parte interesada individual, es

un aspecto clave. Contribuir a las comunidades locales con el empleo de la gente local e introduciendo mejoras en prácticas locales de la salud y de la seguridad, alienta activamente el compromiso de la comunidad y permite establecer confianza en una etapa muy temprana, lo que redundará en beneficios mutuos a través del desarrollo de recursos minerales de alta calidad. El éxito en el resultado de un desarrollo sostenible de las comunidades ayudan a lograr no sólo una licencia para operar, sino también una licencia para crecer.

La norma de la industria minera es que aproximadamente el 0,03 por ciento de los objetivos conceptuales que se evalúan conduce a un descubrimiento. Esto significa que sólo una de cada 3.000 de todas las exploraciones realizadas en distintos emplazamientos pasaría a la etapa de evaluación detallada. Por ello, para agregar realmente valor, los equipos de exploración deberían descubrir regularmente lo que otros podrían llamar depósitos de tipo "company maker". Conocidos como depósitos "Tier 1" (de "Nivel 1"), estos son los depósitos que contribuyen desproporcionadamente a la producción global de una commodity debido a su tamaño y características. Las compañías de tipo "major" tienen como objetivo hacer un descubrimiento de Nivel 1 cada año. Los depósitos "Tier 2" (de nivel 2) son de menor tamaño o menor calidad que los de nivel 1, pero constituyen el 80 por ciento de los depósitos que aportan el 20 por ciento de la producción mundial.

2. PROCESOS Y ACTIVIDADES

2.1. PROCESOS Y ACTIVIDADES

Tal y como se ha venido explicando en el capítulo anterior, las actividades de exploración e investigación minera encaminadas a la localización e investigación de depósitos minerales que sean susceptibles de llegar a ser explotados se inician con un proceso de selección de áreas potencialmente interesantes.

Esta primera toma de decisiones está encaminada a determinar donde, cuando y con qué medios llevar a cabo la exploración y las resoluciones adoptadas deben estar soportadas y apoyadas por la evaluación detallada de las consideraciones e implicaciones económicas del proyecto y su potencial económico.

Imagen 2
Trabajos de campo a partir de cartografía obtenida por vuelo aeromagnético.
(Fuente: Río Tinto)

Imagen 3
Reconocimiento en campo en climatologías adversas.
(Fuente: Río Tinto)

Asimismo, deberán considerarse todos los aspectos relativos a la seguridad y salud, medio ambiente, relaciones con las comunidades, entorno, situación política, etc., factores todos ellos que pueden llegar a influir de una forma muy importante, incluso dramática, en los resultados futuros del proyecto así como en el propio programa de exploración.

En esta primera etapa deben ser clara y directamente descartadas todas aquellas áreas que hayan sido definidas o sean susceptibles a corto plazo de ser consideradas como altamente sensibles desde el punto de vista ecológico o cultural. También se descartarán aquellas zonas (o países) con serios problemas internos de seguridad.

Inmediatamente después de esta definición de zonas y, con carácter previo al inicio de los trabajos de exploración, deberán asegurarse los derechos mineros oportunos y comprobar que los derechos solicitados comprendan todas las áreas de trabajo.

En este sentido, es importante tener en cuenta que muchos países tienen un sistema reglado de adjudicación de derechos mineros que, además de diferir en la normativa, exige considerables gastos y otras obligaciones a las compañías, aparte del hecho de que el permiso o licencia emplaza a la

compañía a desarrollar los trabajos de exploración a lo largo de un plazo de tiempo fijado.

Imagen 4
Reconocimiento desde helicóptero.
(Fuente: Río Tinto)

Imagen 5
Perforación de la campaña de sondeos geotécnicos para el proyecto Las Cruces (Sevilla, España).
(Fuente: Cobre Las Cruces, S.A.)

Los trabajos de campo no debieran iniciarse hasta no tener asegurados los derechos mineros y, en caso de ser absolutamente necesarios, deberán ser lo más discretos posibles. Una vez iniciados formalmente los trabajos de campo en las zonas solicitadas y otorgadas, en el capítulo de las relaciones con las comunidades del entorno, cada vez toma más importancia la obtención de su aprobación y colaboración con carácter previo al inicio de los trabajos, al menos cuando empiezan a emplearse equipos de investigación o maquinaria, si no antes.

La identificación de objetivos de exploración incluye la localización y los trabajos preliminares de toma de muestras en superficie a partir de los afloramientos presentes en el área seleccionada. Es frecuente que los trabajos se inicien a partir del estudio de imágenes satélite y del empleo de otras técnicas de Teledetección (Remote Sensing) y fotografía aérea, con las que desarrollar la búsqueda de evidencias de posibles mineralizaciones. Es entonces cuando puede pasarse al empleo de las investigaciones geofísicas, exploraciones geoquímicas y el desarrollo de distintas cartografías geológicas, respaldadas siempre por los necesarios trabajos y recorridos de campo. En el desarrollo de estas cartografías es fundamental el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que aseguren el correcto tratamiento de las informaciones y bases de datos y agilicen la explotación de la información recopilada.

Imagen 6
Perforación de la campaña de sondeos geotécnicos para el proyecto de la mina de Las Cruces (Sevilla, España).
(Fuente: Cobre Las Cruces, S.A.)

Imagen 7

Modelo digital del yacimiento de Las Cruces, con representación de la campaña de sondeos de investigación.

(Fuente: Cobre Las Cruces, S.A.)

Las investigaciones geofísicas deberán estar orientadas y planificadas de acuerdo al tipo de sustancia buscada y su metalogenia. En líneas generales estas técnicas se basan en el empleo de los instrumentos adecuados para poder realizar el registro y la medida de leves variaciones en las propiedades de la roca tales como la conductividad eléctrica, el magnetismo, la radiactividad, la densidad, etc.

La prospección geoquímica comprende la recogida, el estudio y el análisis de múltiples muestras de agua, sedimentos en lechos de arroyos y corrientes fluviales, suelos, vegetación o roca. Aquellas áreas que muestren registros anormales o inusuales en sus propiedades geofísicas o geoquímicas son susceptibles de contener mineralizaciones, a pesar del hecho de que no debe sorprender que muchas de las manifestaciones o “mineral occurrences” identificadas en estos trabajos sean consideradas posteriormente carentes de

interés y sean abandonadas, dejando de proseguirse los trabajos en ellas.

A la conclusión de estas actividades vendrá una etapa de estudio y análisis de los resultados, descartándose algunas zonas y seleccionando otras de menor amplitud en las que profundizar en el estudio. Es el momento de proceder a una toma más intensiva de muestras para ensayos y análisis.

Esta toma de muestras y la realización de análisis y ensayos contempla siempre una evaluación preliminar del subsuelo en aquellas zonas donde las prospecciones hayan arrojado resultados más prometedores. Aquí, los trabajos podrán incluir la excavación de zanjas, trincheras o bien simples calicatas y pocillos, la perforación de sondeos de reconocimiento, etc.

Esta etapa, que se suele prolongar por varios meses, requiere ya de la adecuada preparación de los accesos necesarios para vehículos, maquinaria y suministros, la planificación de recorridos y campañas y, en su conjunto, la realización de una serie de trabajos que deben ser estudiados de forma detallada para minimizar, prevenir y corregir los posibles impactos negativos sobre el medio ambiente, el entorno y las comunidades afectadas.

Es por ello que en esta etapa son muy necesarios y beneficiosos en general, los encuentros y reuniones con las comunidades y sus representantes y organizaciones, de forma que permitan recabar el apoyo de las mismas pero teniendo siempre cuidado de no crear nunca falsas expectativas que puedan verse defraudadas cuando los resultados de los sondeos y los trabajos de campo resulten negativos o no sean lo suficientemente buenos y, por tanto conduzcan al abandono de los trabajos de investigación en esa zona una vez terminados las labores de restauración y regeneración necesarias.

MATRIZ DEL PROCESO DE EXPLORACIÓN

	Selección de áreas	Identificación de objetivos	Estudio de objetivos	Delimitación de Recursos y Evaluación
Recursos involucrados	El área seleccionada, ¿tiene potencial para contener un yacimiento de interés?	¿Hay evidencia de la presencia de algún objetivo que pueda representar la evidencia de la presencia de un depósito mineral?	¿Cuáles es la naturaleza y abundancia de minerales en el área del objetivo?	¿Cuál es el tamaño, la metalogénia y ley del depósito descubierta? ¿Resulta económicamente interesante?
	Revisión de la información geológica y la historia minera. Identificación de puntos.	Cartografía geológica. Prospección geofísica. Prospección geoquímica.	Apertura de calicatas, pocillos y perforación de sondeos en puntos de limitados.	Perforación de mayor número de sondeos.
Tiempo requerido	Unas pocas semanas.	Algunos meses.	Entre algunas semanas y varios meses.	Entre bastantes meses y varios años.
Costes	Algunas decenas de miles de Euros	Entre decenas de miles a pocos cientos de miles de Euros	Cientos de miles de Euros	Millones de Euros
Impacto sobre el medio ambiente y el entorno	Insignificante	Daños limitados en la vegetación	Pequeñas excavaciones. Utilización de agua con fines mineros. Apertura de caminos y roderas. Emisión de polvo y ruido. Perforación de pozos y sondeos. Apertura de helipuertos. Pequeños campamentos de exploración.	Pequeñas excavaciones. Utilización de agua con fines mineros. Apertura de caminos y roderas. Emisión de polvo y ruido. Perforación de pozos y sondeos. Apertura de helipuertos. Campamentos mayores.
Impacto social y sobre la comunidad	Insignificante	Acceso a terrenos de comunidades. Adquisición o arrendamiento local de algunos suministros y servicios. Contratación de alguna mano de obra local.	Acceso al territorio continuado. Adquisición o arrendamiento local de algunos suministros y servicios. Contratación de alguna mano de obra local.	Acceso al territorio continuado. Adquisición o arrendamiento local significativo de suministros y servicios. Apertura de oficinas locales y necesidades de alojamiento e infraestructura. Contratación de mano de obra local.
Prospecciones que prosiguen hasta la siguiente etapa	100%	- 10%	-0,3%	-0,03%

Fuente: Río Tinto, <http://www.riontinto.com>

Imagen 8
Composición de ortofoto y modelo digital de la excavación prevista en la
mina de Las Cruces (Sevilla, España).
 (Fuente: Cobre Las Cruces, S.A.)

Reviste especial importancia en este apartado el preciso y puntual pago de las compensaciones por daños y perjuicios o las ocupaciones temporales de los terrenos, aspecto que muchas veces es descuidado con las lógicas malas consecuencias.

Es normal y habitual que un alto porcentaje de los sondeos que se perforen resulten negativos hasta que finalmente se consiga alguno positivo. Es fácil que en términos de número de sondeos resulte positivo tan solo uno de cada treinta perforados y es entonces cuando empieza el trabajo de perfilado y delimitación del cuerpo mineralizado, lo cual se realiza mediante la perforación de campañas adicionales de sondeos.

A partir de los testigos obtenidos y las investigaciones por diagráfia realizadas en estos sondeos, se obtendrán muestras y múltiples informaciones para el desarrollo de trabajos de investigación mineralúrgica y ensayos preliminares en laboratorio.

Un yacimiento que demuestre ser suficientemente interesante como para que prosigan los estudios encaminados a convertirlo en una mina dará una media de aproximadamente un sondeo positivo por cada cinco sondeos de perfilado y delimitación.

Figura nº 3

Imagen 9
(Fuente: Rio Tinto)

La subsiguiente etapa de Evaluación de Recursos requiere ya una investigación del depósito mineral mucho más detallada, en la que se perforarán sondeos destinados a determinar el tamaño del yacimiento, los tonelajes, las leyes de mineral y calidades existentes, al tiempo que se analiza la continuidad del yacimiento.

Es por ello que, según el caso y las circunstancias que rodean el yacimiento, pueda requerirse un alto número de sondeos hasta obtener una imagen clara del modelo geológico. Además y, de forma paralela, será necesario avanzar firmemente en el estudio mineralúrgico del yacimiento para analizar la tecnología a emplear, las recuperaciones de mineral obtenibles, los residuos y emisiones, etc., para así proceder a la realización de las evaluaciones económicas preliminares. En esta etapa, un proyecto potencialmente atractivo será identificado en aproximadamente uno de cada dos yacimientos que hayan llegado hasta este nivel de estudio y se haya realizado una evaluación completa de los recursos.

El estudio de viabilidad es ya la última etapa del proceso de evaluación y es llevado a cabo directamente por los ingenieros con experiencia en operación minera y operación de planta mineralúrgica, así como por otros especialistas que participan directamente en mayor o menor grado en los trabajos de diseño, análisis y evaluación.

Es en esta etapa donde se evalúa el método de explotación que se considere más efectivo, los costes de explotación y de proceso, las tasas de retorno, la envergadura de la planta de proceso, los impactos medioambientales y sociales y, en definitiva, la envergadura del proyecto, que será determinante para calcular el flujo de caja resultante de las ventas de minerales, el periodo de retorno de la inversión y el margen de beneficio sobre la inversión. Estos estudios deberán estimar estos datos, año a año, durante toda la vida del proyecto y de la operación minera hasta el agotamiento del recurso mineral y la finalización de la restauración.

Es entonces cuando el estudio de viabilidad es utilizado por los gestores y la Dirección para determinar si efectivamente el depósito cumple los criterios que le permitan ser merecedor de la necesaria inversión para la construcción y puesta en marcha de la mina. En caso afirmativo, se trasladará esta propuesta a los accionistas.

Es importante indicar que, paralelamente al estudio de viabilidad es absolutamente necesario el desarrollo de un Estudio Medioambiental de Base, preciso y detallado, que servirá, entre otros, para aportar datos al necesario estudio de impacto ambiental y la necesaria evaluación del mismo.

Finalizado todo el proceso descrito hasta aquí, el proyecto desarrollado para el estudio de viabilidad y el estudio de impacto ambiental es presentado entonces a las autoridades competentes para su aprobación. Si finalmente se obtiene esta aprobación, el permiso de investigación se transforma en una concesión de explotación y puede iniciarse ya la construcción de la infraestructura e instalaciones para la apertura de la mina.

2.2. ELECCIÓN DE LAS TÁCTICAS Y ESTRATEGIAS MÁS ADECUADAS

Las estrategias de prospección y exploración varían enormemente dependiendo de los siguientes factores:

- La sustancia mineral buscada
- Las características geológicas.
- Las características ambientales y climáticas
- Las restricciones políticas y sociales
- Los recursos humanos y económicos disponibles
- La experiencia del equipo encargado de la investigación
- Los resultados obtenidos en etapas anteriores de la exploración

De una manera esquemática, los tipos de estrategias habitualmente seguidas para el aseguramiento de nuevas reservas podrían clasificarse, de menor a mayor riesgo, en los siguientes grupos:

1. Adquisición por compra de un productor ya establecido.
2. Adquisición de reservas suficientemente investigadas y sobre las que, en su caso, puede existir algún proyecto en desarrollo.
3. Desarrollar, desde el punto de vista minero, un yacimiento suficientemente conocido
4. Explorar yacimientos más o menos conocidos
5. Explorar en busca de nuevos depósitos:

- a. Próximos a los yacimientos ya conocidos
- b. En la propia cuenca minera
- c. En cuencas mineras próximas
- d. En zonas vírgenes presumiblemente favorables

Imagen 10
(Fuente: www.codelco.cl)

En lo que respecta a las tácticas empleadas, la inmensa mayoría de ellas van focalizando de forma progresiva en zonas de tamaño cada vez menor, usándose técnicas de coste progresivamente mayor por unidad de superficie abarcada, reduciendo poco a poco el riesgo de fracaso.

A pesar del importantísimo avance tecnológico que se ha producido en las técnicas empleadas en las distintas etapas y actividades de la exploración e investigación geológico – mineras, el éxito radica en la adecuada y correcta combinación de las más modernas técnicas junto con algunas de las más tradicionales. En este sentido, cualquier táctica necesariamente incluirá, al menos, los siguientes elementos:

- La prospección convencional con sus recorridos de campo apoyados en minuciosos estudios bibliográficos y cartográficos o con la inapreciable ayuda de las personas mayores nativas de la zona en estudio.
- La correcta integración en el contexto del estudio de datos e informaciones obtenidos a partir de la utilización de sensores remotos, imagen satélite y otras técnicas de exploración regional.
- La utilización de Sistemas de Información Geográfico (SIG) y otros sistemas de gestión de grandes bases de datos.
- La utilización de sistemas de modelización geológica, hidrogeológica, geotécnica, minera, etc.
- La utilización de técnicas especiales para la exploración e investigación geofísica, geoquímica, etc.
- El diseño de un programa de perforación de sondeos, adaptado a los objetivos específicos de cada etapa de la investigación y que todavía hoy día son una base fundamental para la captación de datos.

Imagen 11

De la correcta interpretación de las informaciones obtenidas depende la planificación y a la toma de decisiones que afectan tanto a la propia actividad de investigación como a la totalidad del proyecto.

La prospección y la exploración pueden descubrir la evidencia de la existencia de un yacimiento explotable y económicamente rentable, pero la conversión de este yacimiento en reservas explotables demostradas que soporten la actividad minera requieren del trabajo conjunto de técnicos y especialistas en:

- Geología
- Geofísica
- Geoquímica
- Cartografía y SIG
- Teledetección
- Mineralúrgia
- Metalurgia
- Ingeniería Minera
- Ingeniería Industrial
- Biología
- Química
- Derecho
- Medio Ambiente
- Ingeniería Agronómica
- Ingeniería Forestal
- Política
- Economía y comercio
- Etc.

Imagen 12
(Fuente: Rio Tinto)

Imagen 13
Prospección aérea
 (Fuente: Riotinto)

La forma de conocer las propiedades mineralógicas y el contenido de mineral en un macizo rocoso puede obtenerse de dos formas diferentes:

- **Indirecta:** por medio del estudio de parámetros inferidos, a partir de las propiedades de los minerales, de las roca encajante y del macizo rocoso.
- **Directa:** a través del estudio de las propiedades de muestras de minerales y rocas, bien a través del estudio de afloramientos, bien por el estudio de muestras tomadas en profundidad.

Para el estudio de parámetros de forma indirecta se valdrá de técnicas de prospección geofísica, geoquímica, etc. para conocer el comportamiento del terreno frente a estímulos de tipo sísmico, eléctrico y electromagnético, entre otros.

Imagen 14
Afloramiento en superficie
 (Fuente: Hiroshi Ohmoto - Sciencemag)

Imagen 15
(Fuente: Río Narcea Gold Mines, S.A.)

Será la determinación del contenido mineral de un macizo rocoso de manera directa la que necesitará de un gran conocimiento de técnicas de perforación de sondeos en el campo de la Exploración Minera, junto con un estudio geológico pormenorizado de los posibles afloramientos de los yacimientos a estudiar.

2.3. MEDIOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS ACTIVIDADES DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN

Como se ha indicado en los apartados anteriores, los sondeos continúan siendo la herramienta básica a emplear en una investigación geológico – minera. Según el tipo de informaciones a reunir y de las que necesariamente dependerán las decisiones posteriores que proceda tomar, podrá considerarse la siguiente clasificación de estos sondeos o datos necesarios:

GEOLÓGICOS	Investigación	Descubrimiento
	Evaluación	Cuantificación
	Planificación	Detalle operativo
MINEROS	Geotécnicos	Selección de maquinaria
	Drenaje	Calidad y cantidad del agua
	Muestras	Calidad y precio del mineral
MINERALÚRGICOS	Mineralógicos	Tamaño de grano
	Tratamiento	Muestras para mercado
	Económicos	Dureza y abrasividad

Además de los sondeos, existe un amplio y variado conjunto de herramientas que permitirán realizar una investigación rigurosa y seria, pudiéndose citar las siguientes de entre otras muchas:

- Imaginación, experiencia y conocimiento, capacidad para incorporar el conocimiento y la tradición local, apertura de miras, etc.
- Geología general (regional y local), así como geología de campo y de mina.

- Fotogeología y análisis de fotografía aérea.
- Imágenes satélite, sensores remotos y teledetección.
- Geoquímica en sondeo y en campo.
- Geofísica aérea, de campo o en sondeo.
- Levantamiento de mapas y cartografías a distintas escalas, gestión de bases de datos, etc.
- Calicatas o trincheras en afloramientos con atención a las posibles desviaciones en calidades y espesores por alteración superficial.
- Rozas en túneles y pozos.
- Pozos y galerías en zonas experimentales para la confirmación de leyes y las características geomécanicas.
- Geoestadística para extrapolación zonal según el modelo geológico y siempre que existan un número suficiente de datos.
- Plantas piloto, para confirmación de leyes y calidades, realización de pruebas mineralúrgicas y comerciales del mineral.
- Minas pilotos para determinación de parámetros operativos, económicos, mineros y mineralúrgicos.
- Sondeos:
 - Con testigo
 - Ciegos
 - Con testificación geofísica

Se comprueba, pues, que los medios para lograr el conocimiento más preciso y también la medida del grado de incertidumbre serán los clásicos y tradicionales en la minería de todos los tiempos con el añadido de los progresos de la innovación tecnológica

Conclusión previa

De la correcta interpretación de las informaciones obtenidas depende la planificación y la toma de decisiones que afectan tanto a la propia actividad de investigación como a la totalidad del proyecto.

2.4. TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

El proceso de exploración minera recoge un gran grupo de técnicas multidisciplinarias que son complementarias entre sí. Como regla general habrá que seguir una secuencia de trabajo tal que la información obtenida en cada una de las fases sirva de referencia para las fases posteriores.

Con el fin de conocer la integración de los sondeos de exploración dentro del proceso general de prospección, se detallan cada una de las técnicas empleadas. El correcto desarrollo de cada una de las fases determinará el éxito de las siguientes.

Figura nº 4
Proceso de Exploración
(Fuente: Elaboración Propia)

2.5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El primer paso para comenzar el proceso de exploración será el de obtener toda la información previa, existente tanto de las características geológicas de la zona objetivo, así como información de prospecciones realizadas en la zona con anterioridad.

En este aspecto también es de elevada importancia toda la información relativa a explotaciones mineras en dicha zona. Esta información puede extraerse de operaciones mineras que estén actualmente en funcionamiento, o bien de minas que hayan cesado en las labores de extracción mineral.

En aquellos casos en los que no haya información relativa a este respecto, se pueden conocer indicios de restos arqueológicos mineros, que pueden indicar explotaciones minerales en la Antigüedad, y, por lo tanto, una primera señal de presencia de mineral explotable.

2.6. TELEDETECCIÓN Y GIS

La teledetección es la técnica de adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes y datos asociados, que registran el comportamiento del terreno ante energía electromagnética incidente. Esta señal se obtiene por medio de equipos de medida remotos, con equipos inalámbricos. Estos equipos se emplean instalados en aviones y satélites.

En exploración minera se usan ambos sistemas, los basados en aviones y los que emplean satélites para la emisión y adquisición de la información. Algunos sistemas solo están disponibles mediante satélites (Landsat, SPOT) y otros están únicamente disponibles para su uso en aeronaves, como los sistemas hiperspectrales. En cambio, los sistemas Radar se pueden aplicar tanto en satélites como en aeronaves. Los sistemas hiperspectrales se caracterizan por registrar imágenes en cientos de bandas espectrales muy estrechas.

Característica	Landsat 4, 5 Thematic mapper™	Landsat 7 TM estimulado	SPOT Escaner multiespectral (XS)	SPOT Pancromático (Pan)	AVIRIS Escaner hiperspectral
Región Espectral					
Visible e IR reflejado	0,45 a 2,35 mm	0,45 a 2,35 mm	0,50 a 0,89 mm	-	0,40 a 2,50 mm
Pancromático	-	0,52 a 0,90 mm	-	0,51 a 0,73 mm	
IR Térmico	10,5 a 12,5 mm	-	-	-	
Bandas espectrales	7	8	3	1	224
Cobertura de terreno					
Este a Oeste	185 km	185 km	60 km	60 km	10,5 km cross-track
Norte a Sur	170 km	170 km	60 km	60 km	
Resolución terrestre					
Visible y IR reflejado	30 x 30 m	30 x 30 m	20 x 20 m	-	20 m
Pancromático	-	15 x 15 m	-	10 x 10 m	
IR Térmico	120 x 120 m	60 x 60 m	-	-	

Tabla 1
Sistema de Teledetección aplicables a la exploración minera
(Fuente: Sabins, 1999)

Las imágenes adquiridas mediante satélite tienen las siguientes ventajas:

- Pueden obtenerse registros de toda la corteza terrestre.
- Las imágenes cubren gran cantidad de terreno.
- El precio de adquisición por kilómetro cuadrado es relativamente más bajo.

En cuanto a las desventajas de las imágenes obtenidas mediante satélite, pueden ser:

- Las tecnologías hiperspectrales más recientes solo están disponibles para su uso en aeronaves, no en satélite.
- Las campañas de teledetección mediante aeronaves pueden configurarse de tal manera que se

adapte mejor a una cierta zona de estudio.

La información obtenida mediante teledetección se gestiona de manera digital y se integra con la información georeferenciada del terreno mediante programas específicos denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG, o bien GIS, por sus siglas en inglés, Geographic Information System)

Este software permite reunir todos los datos obtenidos y realizar cálculos precisos por ordenador. Los sistemas GIS se integran con otros programas especializados para procesamiento de datos geofísicos y todo tipo de imágenes. Permiten gestionar información referenciada geográficamente mediante capas y solapar datos vectoriales como fallas geológicas, e información geotérmica, por ejemplo.

Imagen 16
Mina Escondida (Chile)
(Fuente: NASA/Japanese Space Team)

2.7. GEOLOGÍA

La geología es la ciencia básica para el estudio de la Tierra, para lograr así determinar posibles zonas de presencia de minerales explotables económicamente. Uno de los aspectos más importantes que aporta la geología al proceso de exploración minera es conocimiento de la paragénesis de los diferentes minerales para saber dónde y cómo aparecen en la corteza terrestre.

A partir de datos obtenidos y junto con el estudio de afloramientos en superficie, la Geología reproduce un modelo del terreno, imprescindible para escoger tanto los lugares donde realizar las prospecciones posteriores, como para definir qué propiedades de los minerales son determinables con las demás técnicas de prospección.

Como herramienta de partida, la Geología se basa en mapas geológicos de la zona objetivo, de modo que determinaría con una mayor precisión los datos concretos de la zona objetivo.

2.8. GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA

En áreas donde los afloramientos son escasos, o bien la zona ha sido extensamente explotada, lo que se suele llamar áreas de exploración “maduras”, se puede hacer uso de las técnicas geofísicas y geoquímicas para incrementar las posibilidades de encontrar contenido mineral.

Imagen 17
Anomalías magnéticas en Exploración
(Proyecto Takhilt, Mongolia)

Las técnicas geofísicas y geoquímicas normalmente miden propiedades objetivas que tienen en mayor o menor medida todos los minerales y que dan lugar a gran cantidad de datos digitales referenciados geográficamente. Los técnicos geofísicos y geoquímicos entienden dos tipos de prospección: aquella que busca definir la geología regional y aquella que busca directamente la presencia de depósitos minerales. En muchos casos, ambos tipos se solapan porque cada tipo puede dar lugar a otro.

El objeto de las técnicas que buscan definir la geología regional es la creación de mapas con la distribución de una cierta propiedad de un suelo o roca. Puede ser, por ejemplo, patrones de reflejo electromagnético, susceptibilidad magnética o conductividad de la roca. Esas medidas no tienen necesariamente una relación directa con un depósito mineral buscado. Los datos son usados junto con mapas geológicos y otros mapas creados al efecto por los geólogos a partir de observaciones directas de la superficie terrestre. Los modelos geológicos son usados para predecir dónde puede encontrarse los yacimientos y dirigir búsquedas posteriores.

El segundo tipo de prospección geofísica/geoquímica, que busca definir directamente un depósito mineral, busca medir valores inusuales o anómalos de rocas, que tienen relación directa con un depósito mineral. Este tipo de prospecciones suele hacerse a partir de datos de prospecciones previas, puesto que cubren un área relativamente pequeña y su coste es generalmente elevado.

El paso crítico es el definir qué valores se consideran “anómalos”, para poder considerar esos valores como parte de un depósito mineral. Estos valores seleccionados serán los que servirán como punto de partida para definir la forma, tamaño y valor del depósito mineral. Para mejorar la precisión de estos datos habrá que recurrir a un programa de exploración más detallada, que suele ser una campaña de perforación de sondeos.

Los principales tipos de exploración geoquímica son:

- Muestreo en rocas: Este tipo de muestreo incluye las rocas superficiales, materiales de filones y capas y trabajos subterráneos.
- Muestreo en redes de drenaje: Incluye muestreos de sedimentos de corrientes de agua, lagos y aguas subterráneas.
- Muestreo de suelos: En este tipo de investigaciones se incluyen el muestreo superficial y profundo de suelos, de suelos transportados y de suelos residuales.
- Muestreos biogeoquímicos: Incluyen el muestreo de hojas y tallos de la vegetación.
- Muestreos geobotánicos: Consiste en la interpretación de la relación entre la litología y los diferentes tipos de vegetación.

En cuanto a métodos geofísicos los métodos que se usan con más frecuencia en la valuación de yacimientos metálicos son:

- Método magnético
- Método gravimétrico
- Métodos electromagnéticos
- Método de polarización inducida
- Métodos eléctricos
- Métodos sísmicos

Imagen 18
Calicata de exploración.
(Fuente: Lucky Strike Resources Ltd.)

2.9. CALICATAS

Cuando aún se tiene incertidumbre de los datos obtenidos, la apertura de calicatas puede ser una forma fácil y rápida de obtener más información litológica y estructural de una zona determinada de la corteza superficial. Para este fin, las calicatas son zanjas de que se abren sobre la superficie hasta alcanzar la roca para conocer la estructura y calidad del material de cobertera que se encuentra cubriendo el macizo rocoso.

Las calicatas cuentan con las siguientes limitaciones:

- La profundidad no suele exceder de 4m
- La presencia de agua limita su utilidad.
- El terreno debe poderse excavar con medios mecánicos.
- Para su ejecución es imprescindible cumplir las normas de seguridad frente a derrumbes de las paredes, así como cerciorarse de la ausencia de instalaciones, conclusiones, cables, etc.

2.10. SONDEOS DE EXPLORACIÓN

La realización de una campaña de prospección puede implicar realizar todas y cada una de las fases anteriores, aunque, durante el proceso, por las características de la zona y resultados obtenidos puede prescindirse de alguna de ellas. Es esencial que una vez dado por finalizado las técnicas de prospección previas se debe haber definido una zona de anomalías que necesite ser estudiada con mayor precisión.

La manera de conocer más en detalle el terreno que presenta tales anomalías es tomar muestras en profundidad de la zona a estudiar, por medio de una, o varias, campañas de sondeos de exploración.

La perforación de sondeos es una de las más importantes y quizá una de las más caras técnicas de exploración. En casi todos los casos, los sondeos de perforación son los que localizan y definen el valor económico de una mineralización, y la perforación proporciona los test esenciales para la verificación de todas las ideas, teorías y predicciones que han sido generadas en prospecciones precedentes y en las demás fases del proceso de exploración.

En cualquier campaña de exploración, el porcentaje del presupuesto asignado a perforación de “sondeos objetivo” (conocidos también como sondeos exploratorios) proporciona una media de la eficiencia de la campaña, entendiendo por “sondeos objetivo” aquellos que se perforan en zonas donde existen pruebas fehacientes de la existencia de mineralización, para distinguirlos de aquellos que se perforan para definir la geología regional. En algunas compañías se ha comprobado a lo largo de los años que, al menos, el 40% del presupuesto de la exploración debe invertirse en la perforación de esos “sondeos objetivo”.

Además de la inversión realizada en sondeos de exploración, es imprescindible que la calidad de los datos obtenidos sea muy alta, porque sobre estos datos se basarán interpretaciones posteriores que implicarán inversiones mucho mayores, como son el diseño de la futura explotación.

Imagen 19
Anomalía geofísica (color violeta) señala el
yacimiento mineral de Las Cruces en
profundidad. CR001: primer sondeo
exploratorio.
 (Fuente: CLC)

2.11. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La última fase del proceso de exploración será la recopilación de todos los datos adquiridos. Con estos datos será necesario el estudio de todos ellos para lograr una interpretación lo más cercana a la realidad posible, realizando un modelo geológico tridimensional que recoja los valores de concentración mineral y su distribución en el macizo rocoso.

El principal problema que surge a veces en el proceso de exploración es la dificultad de pasar de un conjunto de datos discreto, que, aunque puede ser muy numeroso, no son datos continuos que nos permitan definir el cuerpo mineral automáticamente, siendo necesaria una interpretación de los mismos.

Dentro de esta interpretación, uno de los datos clave a obtener es la determinación de las reservas minerales, para lo cual se pueden emplear técnicas clásicas de cubicación (secciones, triangulación o polígonos), o bien uso de modelos de bloques, en los que resultan necesarias técnicas geoestadísticas para su correcta interpretación.

3. LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN

3.1. FINALIDAD DE LOS SONDEOS

Una de las decisiones más difíciles en el proceso de exploración es decidir cuándo empezar la campaña de exploración en campo mediante sondeos e, incluso más difícil es decidir cuándo parar. Es decir, cuándo saber que se tiene información suficiente para definir el cuerpo mineralizado con la precisión necesaria.

La presión de empezar la campaña de exploración será mayor cuando, durante el proceso de exploración, ya se ha identificado una mineralización en superficie. En este punto rápidamente se querrá elaborar un programa para definir el depósito mineral en profundidad. Sin embargo, no se deberá comenzar la campaña hasta que no se tenga una idea general de la geología en superficie para predecir cómo puede ser la configuración del depósito para optimizar el programa de perforación.

El ingeniero encargado de la campaña de exploración se enfrentará a numerosos problemas, tanto logísticos como geológicos. Se deberá tomar la decisión de qué tipo de perforación es la idónea, el espaciamiento entre sondeos, el ritmo de perforación y la empresa de perforación a contratar.

Imagen 20

(Fuente: Minería Chilena www.mch.cl)

En las primeras fases de la exploración los trabajos de perforación se dirigen a obtener una idea de la extensión y forma del cuerpo mineralizado por medio de sondeos a rotación y en fases posteriores se definen la ubicación y el número de sondeos con recuperación de testigo. Esto es debido a que el coste de los sondeos

a rotación es menor que con recuperación de testigo.

La perforación de sondeos permite obtener los datos más fiables acerca de las características del subsuelo que se está investigando. Según el caso, el testimonio físico o material que se obtiene del sondeo pertenece a uno de los siguientes tipos:

- Testigo continuo
- Polvo o detritus
- Diagrafías en barreno.

Imagen 22

Imagen 21

(Fuente: Codelco, Chile)

La técnica de la exploración por sondeos es más amplia y compleja que la simple obtención de la muestra o testigo ya que se deberán considerar otros importantes aspectos como los que se indican a continuación y de cuya calidad y precisión depende la obtención de unos buenos resultados:

- Logística (abastecimiento de energía, agua, emplazamiento, personal, transporte)
- Máquina de sondeo y técnica de la penetración, la toma y almacenamiento de las muestras
- Testificación, capacitación técnica del personal encargado de su realización y momento en que se realiza
- Análisis químico, físico y otros. Laboratorio.
- Comprobación de datos. Chequeo
- Evaluación de resultados.

Aun cuando existen programas y técnicas de evaluación más o menos standard, la realización del programa de evaluación, que permitirá medir los tonelajes, las leyes y el grado de error de la estimación, deberá llevarse a cabo en cada yacimiento, cuenca o mina, adaptándolo a las especiales características del caso. La base del cálculo estará en la determinación de la malla de sondeo, definida por las dimensiones de longitud y anchura media que separarán los sondeos en el campo. La tendencia cada vez más necesaria, por las exigencias de la mecanización, estará en la malla cuadrada o rectangular, si bien se podrán usar otras geometrías más idóneas para el caso según la propia estructura geológica del yacimiento, como la triangular, la del cinco deoros, la rómbica, etc. pero siempre tratando de adaptar la malla al modelo geológico previamente establecido.

Aun cuando no existe una regla general para establecer una malla de sondeos, puede estimarse que, en general, se establecerá una clara diferenciación de las mallas según los objetivos ya señalados anteriormente: Exploración, Evaluación y Planificación operativa.

Como ejemplos indicativos podremos citar los siguientes casos de mallas reales medidas en metros x metros:

SUSTANCIA	EXPLORACIÓN	EVALUACIÓN	PLANIFICACIÓN
Pórfido cuprífero	200 * 200	50 * 50	20 * 25
Carbón	500 * 50	100 * 50	50 * 50
Uranio	250 * 250	50 * 50	10 * 10
Aluvión de oro	1.000 * 1.000	100 * 100	5 * 5

3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SONDEOS

De acuerdo con los distintos criterios, los sondeos se clasificarán en:

- Por su diámetro estándar:
 - AQ = 27 mm
 - BQ = 36,4 mm
 - NQ = 47,6 mm
 - HQ = 73,5 mm
 - PQ = 85 mm
 - Para más de 100 mm se suelen llamar barrenos
- Por su montaje:
 - Manual
 - Estático
 - Móvil-sobre tractor o camión
- Por su energía:
 - Eléctrica
 - Diésel-hidráulica
 - Aire comprimido
- Por su aplicación:
 - Interior o subterráneo
 - Exterior
 - Profundo (petróleo o agua)
- Por su muestra:
 - Discontinuo
 - Testigo continuo
 - Diagrafía
 - Polvo
 - Ciego (diagrafía)

3.3. DIFICULTADES LOGÍSTICAS DE UNA CAMPAÑA DE SONDEOS

La logística del programa de perforación debe tratarse con cuidado para definir adecuadamente el número de equipos, técnicos y humanos, necesarios para perforar, consumibles y repuestos. En ciertos casos, en lo que la campaña se ubica en lugares remotos de difícil acceso, se podrá necesitar apoyo aéreo mediante helicóptero y apoyo por carretera en lugares más accesibles.

A muchos lugares se tendrá que llegar por carretera, lo que implicará construir caminos de acceso y construir plataformas de trabajo para que los equipos de perforación se ubiquen con la mayor estabilidad posible, y en posición horizontal.

Imagen 23
Campaña de exploración en zonas aisladas

El tamaño de la malla de perforación dependerá del objetivo de la campaña y del tamaño de la anomalía encontrada. Esto depende de la información disponible hasta ese momento, y puede no ser precisa. La campaña de sondeos puede cambiar las consideraciones previas en cuanto a la geología del depósito mineral.

En relación al ángulo de perforación, los sondeos verticales son los más fáciles de realizar y los más baratos, y se usan habitualmente para mineralizaciones superficiales o para depósitos diseminados. Sin embargo, los sondeos inclinados habitualmente se eligen para mineralizaciones profundas. En todo caso, el objetivo de toda campaña de perforación deberá ser el interceptar perpendicularmente la mineralización, con el sondeo inicial, inmediatamente debajo de la zona más meteorizada.

Los sondeos de exploración tienen por objeto fundamental determinar la presencia o ausencia de zonas mineralizadas y obtener una idea preliminar de qué ley y tamaño tienen dichas zonas, para llegar a una estimación de la estimación de las reservas minerales existentes. La malla inicial de perforación dependerá de los accesos debidos a la orografía inicial, el cual será muy limitado en zonas de montaña.

Los requisitos de una campaña de exploración juegan un papel importante en la elección del método de perforación. Por ejemplo, si el área a explorar es geológicamente compleja, la estructura geológica es confusa y no hay zonas bien definidas para ubicar el programa de perforación (zonas objetivo), o bien, hay muchas posibles zonas objetivo, puede ser imprescindible incrementar el nivel e conocimiento de la geología a través de los sondeos de perforación. En este caso, la mejora del conocimiento de la estructura del macizo rocoso puede ayudar a priorizar las zonas en las que se han observado anomalías, para comenzar, con campañas de perforación con circulación inversa, o simplemente con una densilla campaña de perforación a rotación.

Además, la elección del tipo de sondeo y diseño de la campaña depende de:

- La geometría del cuerpo mineralizado.
- La calidad necesaria de las muestras.
- Profundidad y diámetro de perforación.
- Accesibilidad de la maquinaria
- Energía disponible

En la exploración en investigación de yacimientos los sondeos se llevan a cabo, habitualmente desde la

superficie y solo en el caso en que la mina esté preparada o en desarrollo se puede proceder a la ejecución de sondeos desde labores subterráneas.

Figura nº 5
Situación ideal de los sondeos, en relación a la mineralización
(Moon, 2006)

Antes de empezar una campaña de exploración, se deben llevar a cabo una de tareas por parte del equipo de geólogos, para asegurar el éxito de la campaña:

- Elaborar mapas de los afloramientos en los alrededores de los sondeos lo más detallada posible (preferiblemente a escala 1:1.000 o mayor) antes de comenzar la perforación. Idealmente, la escala del registro de los datos de sondeo debería ser comparable a los mapas, pero la menor densidad de datos geológicos en superficie se suele elaborar a menor escala.
- Dibujar un perfil geológico a lo largo del sondeo propuesto. Si existe alguna superficie en relieve significativa, dibujarla con una precisión en la escala vertical de un metro. Si no hay mapas topográficos que lo reflejen, deberán elaborarse a posteriori.
- Dibujar una sección con la trayectoria propuesta para el sondeo, junto con el resto de información obtenida en prospecciones previas, de tipo geofísico y geoquímico, por ejemplo.
- Predecir las intersecciones con estructuras geológicas que deberá encontrarse el sondeo en su trayectoria.
- Estas predicciones deberán ser anotadas para tener en cuenta los motivos de perforar cada sondeo y qué es lo que se espera encontrar en cada uno, además de ser un apoyo para interpretaciones posteriores, para resolver posteriores conflictos en la interpretación de resultados.

Las campañas de perforación deben ser controladas en todo momento para controlar los costes del mismo. Se deben identificar cada una de las intersecciones con el cuerpo mineralizado.

En las fases iniciales de la perforación el ingeniero responsable de la campaña debería estar a pie de sondeo para controlar rápidos avances, controlando el detritus de perforación recogido de sondeos perforado con equipos a rotopercusión, por ejemplo. En el caso de perforación con recuperación de testigo, se deberá examinar el testigo recuperado diariamente, hacer los registros iniciales, y decidir la ubicación de los siguientes sondeos, teniendo especial dedicación cuando se intercepten mineralizaciones o se esté cerca del final programado de sondeo.

Se deberán registrar y dibujar de forma gráfica los datos de la mineralización, las litologías y estructura de la roca encajante. Tan pronto como la información esté disponible.

Usualmente la decisión más difícil al estar al frente de una campaña de exploración es decidir cuándo parar de perforar. Las principales situaciones para tomar esta decisión son:

- No se ha encontrado ninguna mineralización.
- La mineralización se ha interceptado, pero no es de ley económicamente explotable.
- La perforación ha interceptado mineralizaciones de ley explotable, pero la continuidad de la misma es limitada o el tamaño de la misma no es de interés.
- El cuerpo mineralizado es de ley explotable y se ha definido el yacimiento con suficiente precisión.
- Se ha acabado el presupuesto.

Toda la información obtenida de los sondeos debe ser almacenada tanto si el resultado de la campaña es positivo, como si se hubiera abandonado por no encontrar ningún cuerpo mineral. Esto es debido a que la información obtenida puede ser útil para posteriores campañas de exploración de la misma empresa, o incluso, puede ser información rentable para otras empresas de exploración.

3.4. PERFORACIÓN DESDE LA SUPERFICIE

Con el fin de tener mayor probabilidad de interceptar yacimientos verticales o sub-verticales, generalmente, los sondeos de superficie se perforan inclinados, de 30° a 60°, con respecto a la horizontal. Un sondeo inclinado dará en yacimientos horizontales un volumen de muestra mayor que el que corresponde al espesor real, por lo que deberá prestarse atención a la corrección de la dimensión obtenida.

3.5. PERFORACIÓN SUBTERRÁNEA

Los sondeos realizados desde labores subterráneas pueden ser:

- Verticales
- Inclinados
- Horizontales

Las dimensiones de las galerías limitan el tamaño de la maquinaria, limitando, por tanto, la longitud de avance de la sonda.

Las sondas deben estar habilitadas para perforar en todas direcciones, siendo la polivalencia del equipo un factor clave. Puede ser necesario el empleo de tubos sacatestigos y varillaje más corto de lo normal (< 3m). Por este motivo el número de maniobras se incrementa en gran medida, por lo que tener sistemas automatizados de manejo del varillaje incrementa en gran medida la producción.

Figura nº 6
Sondeos en una previamente explotada
 (Moon, 2006)

3.6. MALLAS DE SONDEOS

La decisión acerca del número de sondeos, y su disposición geométrica es compleja y de extrema importancia, interviniendo factores de diferente tipología:

- Factores geológicos
- Factores económicos
- Factores estadísticos

El primer sondeo a realizar se realizará normalmente en el punto en el que se haya detectado en superficie la anomalía más notable en procesos de prospección previos. La mayoría de programas de sondeos se planifican de modo que, después del sondeo inicial se perforan varios sondeos, revisando los resultados una vez finalizados para comprobar que los resultados concuerdan con los esperados.

A partir de aquí, el espaciamiento entre sondeos vendrá definido por el tamaño de la anomalía detectada, datos de depósitos similares, información de campañas de exploración próximas, y de la experiencia del equipo de investigación.

La localización y orientación de los sondeos vendrá definida por los resultados del sondeo inicial. Si este primer sondeo no refleja el contenido mineral esperado, se debería seleccionar la siguiente anomalía objetivo para su estudio.

Una vez que el depósito ha sido definido, al menos parcialmente, se debe verificar la continuación de la mineralización. Llegados a este punto, el espaciamiento entre sondeos dependerá del tipo de mineralización y la continuidad predicha en estados previos de la exploración. Por ejemplo, en el caso extremo en el que se trate de un depósitos filonianos, el objeto de los sondeos será principalmente para definir la estructura, más que para definir la concentración de mineral, la cual puede ser determinada de mejor forma mediante muestreos desde el subsuelo. El espaciamiento entre sondeos típico para depósitos filonianos es de 25-50 metros y para depósitos estratificados, desde cien metros hasta varios cientos de metros

Las mallas de sondeos pueden ser regulares o irregulares. Aunque las condiciones geológicas puedan favorecer inicialmente las mallas irregulares, serán de mayor utilidad las mallas regulares ya que proporcionan un grado de conocimiento uniforme y permiten efectuar más fácilmente una interpretación visual de los resultados. Las mallas regulares son aquellas que presentan, en proyección horizontal un esquema geométrico definido.

Las mallas pueden ser: rectangulares, triangulares o poligonales. Las más utilizadas son las mallas rectangulares y triangulares porque presentan mayor facilidad en los trabajos de evaluación de reservas.

Los espaciamientos de malla utilizados generalmente (y para que sirvan de referencia) en la investigación de diferentes tipos de yacimientos se muestran en la tabla adjunta.

Tipo de yacimiento	Espaciamiento de malla
Pórfidos cupríferos	75 x 100 m 50 x 75 m
Hierro (taconita)	60 x 90 m 30 x 60 m
Bauxita	15 x 30 m
Molibdenita	60 x 60 m
Carbón bituminoso	500 x 500 m 150 x 150 m

La malla de sondeos óptima será aquella que proporcione mayor cantidad posible de información, al menor coste posible.

Frecuentemente, las campañas de sondeos se plantean con una secuencia o avance en etapas en las que la abertura de la malla se cierra progresivamente. La toma de decisiones depende mucho del volumen de datos disponibles y determinaciones analíticas, así como la interpretación geológica. En este campo la geoestadística es determinante.

Figura nº 7
Secuencia de perforación de campañas de sondeos
 (Modificado de López, 2001)

3.7. MUESTRAS PROCEDENTES DE SONDEOS

Aunque se piense que una campaña de sondeos se planifica por adelantado, cada sondeo proporciona información al conocimiento de la estructura geológica, de modo que este programa puede sufrir variaciones a medida que avanzan los trabajos de perforación. Para poder tomar decisiones a este respecto se tiene que supervisar la campaña y recoger todas las muestras extraídas y almacenarlas adecuadamente.

Los tipos de muestras que pueden obtenerse de los sondeos pueden ser:

- Detritus seco obtenido durante la perforación de sondeos con aire, recogiendo mediante ciclones y colectores de polvo
- Detritus húmedo, obtenido del lodo procedente de la perforación en la que se ha empleado agua como fluido de barrido. Habrá que someterlos a tratamientos posteriores para su reconocimiento.
- Testigos de suelo o roca obtenidos con tubos sacatestigos

3.7.1. RECOLECCIÓN DE DETRITUS SECOS

El detritus seco obtenido de emplear perforación con circulación inversa se obtiene a través de un ciclón colocado en el retorno del fluido de barrido. Con la doble sarta de perforación que tiene la perforación con circulación inversa, el aire comprimido se inyecta a través del espacio anular entre los dos tubos y retorna a la superficie por el interior de la sarta, transportando el detritus en suspensión. De este modo se protege el detritus de posibles contaminaciones.

Es importante que se vaya recolectando la mayor cantidad de detritus posible a intervalos de perforación constantes. El perforista logra esto de tres formas diferentes:

- El sondeo es sellado en el emboquille, de modo que la muestra debe circular a través de toda la sarta de modo que acabe en un colector de polvo en la parte superior de la sarta.
- El sondista continúa aplicando aire a alta presión por un pequeño periodo de tiempo después de cada avance (generalmente 1 ó 2 metros) para limpiar todo el detritus de la sarta, antes de efectuar una nueva maniobra. Esta técnica se conoce como “blowback”
- En la cabeza de perforación, todo el detritus pasa a través de un ciclón de gran tamaño, de modo que sedimenten todas las partículas en suspensión.

Figura nº 8
Recogida de muestras de detritus en perforación con circulación inversa
(Sandvik, Marjoribanks 2010)

3.7.2. RECONOCIMIENTO DE TESTIGOS DE ROCA

Los testigos obtenidos mediante perforación con corona de diamante proporcionan información muy valiosa para una identificación geológica posterior. Pero el manejo de los testigos se debe realizar de manera sistemática y muy cuidadosa, para no proporcionar información confusa o errónea. Además, la cantidad de metros de testigo obtenido es tal que se necesitan una infraestructura que permita su almacenamiento para poder localizar fácilmente cada sondeo realizado.

Para ello, toda la longitud de sondeo recuperado se coloca en las llamadas “cajas de testigos, que serán aquellos elementos que permitan almacenar las muestras obtenidas de manera ordenada para su posterior reconocimiento y reconstrucción de la secuencia obtenida.

Con un primer vistazo sobre la caja de testigos de roca se pueden observar estructuras litológicas a gran escala, pero para observar formaciones más en detalle hay que extraer el testigo de la caja y rotarlo para incidirle luz en diferentes direcciones. Una vez identificada la litología, habrá que identificar la orientación de las estructuras encontradas para correlacionarla con la estructura del macizo rocoso.

Se suele estar familiarizado con la apariencia de la estructura de la roca de forma plana o relativamente plana, como aparecería en un afloramiento, en un mapa, o en referencias bibliográficas. Si embargo, la misma estructura a veces puede resultar difícil de identificar o de interpretar correctamente cuando se presenta en forma cilíndrica en un testigo de un sondeo.

Figura nº 9

Trabajo con testigos de roca y cajas porta testigos
(Abra Mining)

La traza de una estructura plana (como juntas o filones,) en la superficie de un testigo cilíndrico, aparece como una elipse. Cualquier elipse puede ser definida por la longitud de su eje mayor, su eje menor y el ángulo entre ambos. De este modo, se puede referenciar estos datos con la orientación del sondeo, para conocer la posición real de la estructura reconocida.

En los testigos también pueden reconocerse fallas, mejor dicho, micro-fallas. Cuando la falla intersecta una estructura previa en un gran ángulo, el desplazamiento puede observarse a simple vista. A veces, se ignoran las micro fallas durante el registro de datos en el sondeo, pero a veces, puede ser un indicativo de fallas a mayor escala.

En ocasiones el testigo se presenta de aspecto frágil, o incluso hay zonas de poca o nula recuperación de testigo. Estas pueden ser debidas a zonas más frágiles del macizo rocoso, como presencia de intercalaciones de arcilla, o ser indicativo de zonas de fluencia de agua, o alteraciones anómalas en profundidad.

Figura nº 10
Aspecto de estructuras planas y fallas en testigos de roca
 (Marjoribanks,2010)

En pequeñas piezas de testigo es relativamente fácil ver pequeñas estructuras, o bien, espaciamentos de juntas pequeños, pero estructuras grandes, es decir, para formaciones geológicas mucho mayores que el diámetro del testigo, pueden ser difíciles de reconocer en el testigo.

Figura nº 11
Efecto de escala en los testigos de sondeos
 (Marjoribanks, 2010)

3.7.3. MUESTREO Y ENSAYO DE TESTIGOS

El análisis y ensayo de testigos durante las fases tempranas de la campaña de exploración tiene dos propósitos. El primero es proporcionar un índice de las potenciales leyes minerales presentes, en caso de que las haya. El segundo es conocer dónde están y de qué forma están distribuidas esas leyes en el depósito mineral. Este conocimiento es necesario para ubicar la perforación de nuevos sondeos.

En la primera fase de la campaña de exploración, los intervalos de la toma de muestras durante la perforación de un sondeo los determina la geología. Es decir, aunque se debe marcar y catalogar toda la longitud del testigo del sondeo, se tiene que prestar especial atención a los modelos establecidos por métodos previos, para detectar las estructuras presupuestas en los modelos geológicos. Estos intervalos de interés serán seleccionados en función de la geología y se deberán indicar sobre el propio testigo a medida que se obtienen las muestras. Los límites de la mineralización deberían corresponder con los que la geología indicaba previamente, pero se deberán reflejar los límites reales encontrados. Puede decirse que cada muestra debe responder a las incertidumbres que la geología encontraba.

Cuando por la calidad del material no puede recuperarse el testigo correspondiente a una longitud determinada, es importante reflejar este hecho, para una correcta interpretación posterior.

Cuando se vayan a realizar ensayos sobre los testigos de toca, es habitual que se realicen ensayos destructivos, por lo que, no se podrían realizar ensayos posteriores. Por ese motivo es habitual cortar mediante sierra circular el testigo por su eje longitudinal, por la mitad, o incluso en cuatro partes. La decisión de usar el testigo completo, medio testigo o un cuarto de testigo depende del contenido mineral, de modo que la muestra tomada sea representativa del contenido mineral del testigo completo. Por este motivo, en el caso de la prospección de oro, es mejor utilizar muestras cuanto más grandes mejor. Sin embargo, el ensayo de testigos completos debería considerarse siempre como último recurso, porque, como se ha dicho anteriormente, se imposibilita un reconocimiento posterior.

Los métodos para tomar muestras de testigos para su ensayo dependen del estado del testigo: Algunos de estos métodos son:

1. Muestreo con navaja. Esta técnica se emplea cuando se encuentran estructuras húmedas de arcilla. Este material es blando y solo se puede realizar su ensayo, cortando escamas con una navaja.
2. Muestreo con cuchara. Si el material está altamente fragmentado, el único método realístico es usar una cuchara o una espátula para recoger una sección representativa de la muestra para cada intervalo objeto de estudio. Se deberá repartir homogéneamente la muestra y dividir en mitades, ensayando una mitad y guardando el resto.
3. Molienda del testigo. Si la muestra no se considera interesante para ser cortada con sierra circular, se puede moler parte del testigo completo para ser ensayada por métodos geoquímicos a modo de comprobación.
4. Fragmentación por cincel. En rocas cristalinas relativamente homogéneas como rocas ígneas o rocas sedimentarias masivas pueden obtenerse muestras para ensayo con un cincel. Este método es útil en el caso de que se trabaje en lugares remotos, donde no haya disponible una sierra de disco.
5. Corte con sierra de disco. Este es el método estándar de trabajo y el preferido para tomar muestras de testigos. En este caso el testigo es cortado longitudinalmente con una sierra circular usando discos de diamante. Este método es relativamente lento y caro, es la única manera de obtener una muestra de testigo de manera precisa.

Figura nº 12
Sierra de disco para testigos de roca
(Fuente: Strength Int. y E.A. Minerals)

4. SISTEMAS DE EVALUACIÓN Y CODIFICACIÓN DE YACIMIENTOS

4.1. KEY CONCEPTS

Para lograr la visualización o modelización del yacimiento se podrán emplear los sistemas siguientes:

- Geométricos
- Morfológicos
- Matemáticos

Como regla aplicada se pueden aconsejar el empleo de las siguientes técnicas en los casos supuestos:

- **Para Yacimientos horizontales:**

Creación de los planos de isovalores o Isopacas.

- **En Yacimientos tridimensionales:**

Realización de una matriz de bloques codificables con los datos mínimos de:

- 3 de coordenadas
- 3 de datos petrográficos
- 3 o más de leyes o calidades

- **Para Yacimientos verticales o inclinados:**

Establecimiento y descomposición en secciones transversales equidistantes.

- **Para yacimiento más erráticos y aleatorios:**

Se pueden emplear técnicas estadísticas o geomatemáticas para la determinación del valor o calidad de un bloque en función de:

Inverso del cuadrado de la distancia

Inverso de la distancia
Kriging

La realización del inventario o modelo geológico, que puede denominarse “discretización” o “modelización”, mediante medios informáticos, será la base de cálculo para:

- La definición de mineral / minerales.
- La secuencia de explotación o camino
- El ataque inicial prioritario
- Una medida de la futura correlación o desviación entre plan y producción real.

La buena práctica operativa recomienda establecer una unidad de medida de la calidad del mineral, que actuará como un parámetro único de control o como un patrón unificado artificial. Son ejemplos la utilización del ROLE o el GEAU (gramo equivalente de Oro) o el metal equivalente principal contenido, que no son más que unos instrumentos de medida o comparación en función de la suma polinómica de los productos de la ley por el rendimiento y por la cotización, pasado o no a una unidad económica menos aleatoria, como puede ser el Dólar USA, el Euro o el gramo de oro o bien tan solo por la ley del metal más importante del yacimiento. Tal parámetro de medida será realmente una síntesis de las leyes, recuperaciones y cotizaciones de los "n" elementos de la fórmula expresada en el valor de una moneda o de uno de ellos para evaluar el conjunto y poder pasar a unas etapas de optimización económica posterior.

Para lograr la visualización o modelización del yacimiento de forma manual, se podrán emplear las **técnicas de cubicación** siguientes:

Por trapecios o zonas para su aplicación en la cubicación de depósitos alargados mediante perfiles o secciones, como ocurre en el caso de los yacimientos carboníferos o sedimentarios.

Se determinarán una serie de perfiles mediante líneas constituidas por filas de sondeos o datos separados a una distancia fija "d". La superficie del criadero interceptada por cada perfil valdrá su descomposición en trapecios y en dos triángulos finales en sus extremos según la fórmula siguiente:

$$S_k = d \left(\sum P_i + \frac{3}{4} \sum P_{ex} \right)$$

De esta manera se determinarán las superficies del depósito en todas las secciones o perfiles y posteriormente se calculará el volumen del tronco de pirámide entre cada dos secciones por la fórmula siguiente:

$$V_k = \frac{I}{3} (S_k + S_{k+1} + \sqrt{S_k * S_{k+1}})$$

La suma de todos los volúmenes obtenidos para las secciones determinará el volumen total del criadero que, para una densidad δ_m y una ley media l_m , por simples métodos estadísticos obtendremos un contenido en el metal o producto vendible de:

$$T_m = \sum V_k * \delta_m * l_m$$

Por pozos, socavones y galerías: Para la determinación más precisa de los parámetros geomecánicos, físicos, químicos y mineralógicos en los grandes depósitos mineralizados y especialmente para las sustancias metálicas, radioactivas y preciosas de alto valor se utiliza la ejecución de minas piloto por medio de pozos, socavones y galerías para la toma de muestras frescas.

Comprobada la presencia y la importancia del volumen de mineral encontrado se llevará a cabo un acceso al mismo para la toma de muestras en volumen y cantidad adecuados y con ello alimentar a la planta piloto de proceso o tratamiento para un estudio más directo y real del mineral y de los parámetros de diseño de mina y planta por medio de:

1. Socavón o acceso horizontal, transversal o en dirección hasta llegar a la mineralización para recorrerla y efectuar una toma de muestras por rozas en las paredes.
2. Pozos o pocillos rectangulares o circulares de 1,5 a 3 metros de diámetro y hasta 30 metros de profundidad con una toma de muestras "bulk" cada metro.
3. Galerías en dirección y/o transversal al deposito para la determinación de su espesor o dimensiones y la regular toma de muestras "bulk".

Por polígonos de Thyssen o bloques: para la cubicación de aquellos cuerpos mineralizados con una morfología variada y variable y una distribución irregular y/o aleatoria de las calidades de los minerales, se podrá utilizar una descomposición del mismo por medio de polígonos determinados por las mediatrices de los sondeos efectuados sobre el depósito. El dominio de influencia de cada sondeo lo constituirá la superficie situada más cerca de ese sondeo que de cualquier otro, lo cual se efectúa trazando las mediatrices en los segmentos que unen cada dos sondeos. En el caso, cada día más habitual, de haber empleado una malla cuadrada o rectangular la descomposición dará lugar a un Modelo de muro, llamado por ello de bloques o ladrillos, de dimensiones similares a la malla de sondeos y de altura igual a la del banco de explotación.

Obtenida la superficie de cada polígono, bien por planímetro o por cualquier programa informatizado de integración de datos, se multiplicará por la altura del banco proyectado o por la potencia o por la medida de la división de la toma de muestras de los sondeos. Cualquier característica física, química o geomecánica, interesante para mejorar la cubicación, (p.e. la densidad, resistencia, porosidad, etc.) se asimilará a la medida en el sondeo correspondiente. De esta manera el volumen de cada bloque o prisma será:

$$V_i = S_i \times h_i$$

Si la densidad media δ_i y la ley media l_i son consideradas en el tramo o altura del bloque tendremos que las reservas en tonelaje y en producto vendible serán las siguientes:

$$\text{Contenido} = S_i * h_i * \delta_i * l_i$$

$$\text{Reservas} = \sum V_i * \delta$$

Las técnicas de evaluación geoestadísticas o Krigeage, que aplicará a cada bloque, no la ley real del sondeo que lo ha atravesado, sino una ley estimada en función de las leyes existentes en el entorno, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a dicho bloque (variograma), hacen que el error de estimación del bloque sea mínimo.

La ventaja que pudiera suponer medir el error o riesgo del conjunto del depósito no suele compensar la dilución de la calidad, que implica una reducción de la ley media en función de la existencia de más bloques de estéril que de mineral. Debe tenerse en cuenta que ésta técnica no tiene en cuenta que posteriormente en operación se aplica una selectividad minera operativa que permitirá la extracción de mejores leyes, principalmente por el efecto de la malla más cerrada de control de leyes o voladura y una calidad de carga y transporte diferenciado, así como por una política de "blending" o mezcla de minerales de tajos separados. Ello permitirá en la práctica obtener una ley más parecida a la dada realmente por el sondeo. Esta es la razón de los casos de importante desviación entre la ley dada por el Krigeage y la recibida por la planta de tratamiento en las minas, que han llegado a alcanzar hasta un 25% de ley superior en la planta que en la teoría geoestadística.

5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RESERVAS

5.1. KEY CONCEPTS

Durante el proceso de exploración y evaluación inicial del depósito mineral, el principal énfasis se ha puesto en definir la geología y la estimación de la cantidad y calidad de recursos existentes.

Los datos son recopilados desde diversos programas de muestreo, incluyendo campañas de perforación de sondeos, información de calicatas, etc... obteniendo muestras directas, en forma de detritus, en forma de testigo o en forma de muestras de rocas tomadas en afloramientos. El objetivo de todo este proceso es el de obtener un "inventario" de minerales. Solamente una vez conocido el contenido de mineral presente en el macizo rocoso, junto a la forma del depósito mineral, será posible comenzar la evaluación del proyecto minero, para saber si es rentable la explotación del mismo por métodos mineros. En este aspecto será la "ley de corte", la que establezca qué yacimiento es económicamente explotable y por otro lado habrá que establecer cuál es el método óptimo de explotación.

Para la estimación de los recursos minerales disponibles se pueden distinguir los métodos: los métodos convencionales y los métodos geoestadísticos, además de los basados en estadística clásica.

5.2. MÉTODOS BASADOS EN ESTADÍSTICA CLÁSICA

Unos de los métodos de estimación de reservas empleados son aquellos que se basan en el uso de estadística básica para su definición. El uso de estos métodos generalmente está restringido a una estimación global del volumen o ley que comprende el depósito mineral.

Estos métodos se basan en establecer una serie de valores que se asignan como valores medios a un área definida. En este aspecto se usará el cálculo de la varianza como una medida del error de estimación realizado.

Cuando se usan métodos de estadística no espacial es importante que las muestras tomadas sean independientes unas de otras (este aspecto se cumple para muestras aleatorias, por ejemplo). Si la toma de muestras se tomara asumiendo algún conocimiento geológico previo de la estructura mineral, el depósito calculado tendría un sesgo en su definición por estos métodos. En estos casos habría que aplicar este método diferenciando las zonas previamente definidas.

Los datos obtenidos se suelen representar habitualmente en gráficos de distribución de frecuencias (histogramas) y diagramas de dispersión (gráficos de correlación). Las distribuciones se suelen aproximar a distribuciones de tipo gaussiano o log-normal.

Figura nº 13
Representación de datos
(Moon, 2006)

5.3. MÉTODOS CONVENCIONALES

En el cálculo de los recursos o reservas potenciales de un determinado depósito mineral una de las fórmulas ampliamente usadas es:

$$T = A \times Th \times BD$$

Donde “T” es cantidad de reservas (en toneladas), “A” es el área de influencia de una sección plana (en km²), “Th” es el espesor del depósito en ese área de influencia (en metros) y “BD” es la densidad del material en el macizo. Ésta densidad incluye el espacio ocupado por los poros. Se obtiene en laboratorio, a partir de muestras de campo.

Figura nº 14
Métodos convencionales de estimación del área de influencia: a) isopacas
(curvas de mismo espesor), b) polígonos, c) triángulos, d) secciones, e)
malla aleatoria.
 (Moon, 2006)

El área de influencia se obtiene de un plano o sección del depósito geológicamente definido. Los métodos convencionales habitualmente usados son: contornos de espesor, construidos manualmente sobre plano, polígonos, triángulos, secciones o una malla aleatoria.

La elección de cada método dependerá de la forma, dimensiones y complejidad del depósito mineral y del tipo, dimensiones y patrón de muestreo (malla de muestreo). Estos métodos tienen varios inconvenientes que están relacionados con las hipótesis sobre las que están basados, especialmente el área de influencia de los datos de muestreo y generalmente no tienen en cuenta ninguna correlación de mineralizaciones entre muestras ni cuantifican ningún tipo de error de estimación.

Existen otros métodos englobados como métodos convencionales, como el método del inverso de la distancia, usado principalmente en paquetes de análisis informático.

Estos métodos son ampliamente conocidos, y aplicados en minería con un éxito considerable. Los resultados obtenidos aplicando cada uno de los métodos se deberían contrastar entre sí para obtener un resultado adecuado.

5.4. MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS

De manera general, se puede decir que los métodos geoestadísticos están basados en que las variables de un depósito mineral (leyes, espesores de la mineralización, etc.) son función del medio geológico. Si cambian la geología y las condiciones estructurales se producen cambios en la ley o calidad del mineral y la distancia entre mineralizaciones o, incluso la potencia dentro de un mismo depósito mineral. Sin embargo, las muestras que son tomadas relativamente próximas tienden a reflejar las mismas condiciones geológicas y tienen similar ley y similar potencia de mineralización.

A medida que la distancia entre muestras crece, la similitud, o grado de correlación, disminuye, hasta que se

llega a una distancia en la que no hay correlación entre ellas.

5.5. SEMI-VARIOGRAMAS

Los métodos geoestadísticos cuantifican este concepto de variabilidad espacial dentro de un depósito y se muestra en forma de semi-variograma. Una vez calculado ese semi-variograma se tiene que interpretar ajustándolo a un modelo definido. Existen diversos modelos que ayudan a identificar las características del depósito a estudiar.

Figura nº 15

Ejemplo de semi-variogramas: teórico (derecha) y experimental (izquierda)
(Moon 2006)

Suele haber habitualmente una discontinuidad cerca del origen, que se denomina “efecto pepita” (C_0). Esto es generalmente debido a diferencias entre valores de las muestras, o bien, para el caso de muestras muy cercanas entre sí, como pudieran ser dos mitades de un mismo testigo que puede incluir inexactitudes en el muestreo o en ensayos, y están asociados a errores aleatorios.

En el semi-variograma se observa una zona de gran pendiente que indica un rápido cambio en la variabilidad de los resultados, y una zona donde la pendiente del gráfico se acerca a cero. A partir de ese punto los valores de la muestra son independientes entre sí, y presentan una variabilidad igual a la varianza teórica de las muestras. Es decir, los valores obtenidos de muestras separadas una distancia mayor no muestran ninguna correlación entre sí.

La representación de semi-variogramas tiene un cierto carácter anisotrópico. Es decir, el estudio tiene cierto carácter vectorial, lo que implica que las distancias medidas entre muestras dependen de la dirección que se considere. Esto se acusa en mayor medida, por ejemplo en depósitos de tipo filoniano.

5.6. KRIGING

El Kriging es una técnica geoestadística de estimación usada para estimar el valor de un punto o un bloque como una combinación lineal de variables desde muestras normalmente distribuidas en cada bloque. Esta técnica considera una variabilidad de las muestras en la asignación de los pesos de cada una. El Kriging es capaz de medir el error esperado o estimado.

Este método da mayor peso en el cálculo a muestras cercanas entre sí, que a muestras distantes, de modo que se establezca un parámetro para mostrar la continuidad, anisotropía y geometría del depósito mineral.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bar-Cohen (2009) "Drilling in Extreme Environments", Willey-VCH GmbH.
- Castilla Gómez, J.; Herrera Herbert, J. (2012). "El proceso de exploración minera mediante sondeos". Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio de Tecnologías Mineras.
- Escalante, M. (2004). "Métodos Geoquímicos de Exploración Minera". Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura México.
- Gunter, F. (1991). "Principles and Applications of Inorganic Geochemistry". Macmillan Publishing Co.
- Hartman (1987), "Introductory Mining Engineering", Wiley-Interscience Publication.
- Herrera Herbert, J. (2015). "Introducción a las actividades de prospección y exploración minera". Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio de Tecnologías Mineras.
- Levison, A. A. (1980). "Introduction to Exploration Geochemistry". 2ª edición. Applied Publishing.
- López Jimeno, C. (2001) "Manual de Sondeos. Aplicaciones". E.T.S.I Minas. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Marjoribanks (2010), "Geological Methods in Mineral Exploration and Mining", 2ª Edición, Springer.
- Moon, et al. (2006) "Introduction to Mineral Exploration", 2ª Edición. Blackwell Publishing, Reino Unido.
- Rose A. W. et al.(1979). "Geochemistry in Mineral Exploration".
- Sabins (1999), "Remote sensing for mineral exploration", Ore Geology Reviews N.14
- U.S Bureau of Reclamation (2001). "Engineering Geology Field Manual". U.S. Department of the Interior.