



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

E.T.S. DE
INGENIEROS DE
MINAS DE MADRID



EL PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA MEDIANTE SONDEOS

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE
RECURSOS MINERALES Y OBRAS
SUBTERRÁNEAS
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS
MINERAS

JORGE CASTILLA GÓMEZ
JUAN HERRERA HERBERT

MADRID, 2012

EL PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA MEDIANTE SONDEOS

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE
RECURSOS MINERALES Y OBRAS
SUBTERRÁNEAS
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS
MINERAS

JORGE CASTILLA GÓMEZ
JUAN HERRERA HERBERT
MADRID, 2012

© Jorge Castilla Gómez

jorge.castilla@upm.es

© Juan Herrera Herbert

juan.herrera@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid

Departamento de Explotación de Recursos Minerales y
Obras Subterráneas

Laboratorio de Tecnologías Mineras

2012

Diseño de la Portada: Los autores

Imagen de portada: cortesía de Atlas Copco

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, los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, distribuidor o fabricante de confianza.

Índice de la obra

1. PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 LA PROSPECCIÓN Y LA EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA.....	5
2. TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES	9
2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	10
2.2 TELEDETECCIÓN Y GIS.....	10
2.3 GEOLOGÍA.....	12
2.4 GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA.....	13
2.5 CALICATAS.....	15
2.6 SONDEOS DE EXPLORACIÓN.....	16
2.7 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	17
3. TÉCNICAS DE PERFORACIÓN APLICADAS A LA EXPLORACIÓN MINERA	19
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.2 PERFORACIÓN A ROTACIÓN.....	21
3.3 PERFORACIÓN CON MARTILLO EN CABEZA.....	25
3.4 PERFORACIÓN CON MARTILLO EN FONDO.....	25
3.5 PERFORACIÓN A ROTACIÓN CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO.....	26
3.6 PERFORACIÓN A ROTOPERCUSIÓN.....	31
4. CAMPAÑAS DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN	33
4.1 PERFORACIÓN DESDE LA SUPERFICIE.....	37
4.2 PERFORACIÓN SUBTERRÁNEA.....	38
5. MALLAS DE SONDEOS	41
6. MUESTRAS PROCEDENTES DE SONDEOS	43
6.1 RECOLECCIÓN DE DETRITOS SECOS.....	43
6.2 RECONOCIMIENTO DE TESTIGOS DE ROCA.....	44
6.3 MUESTREO Y ENSAYO DE TESTIGOS.....	47
7. LABORES DE INGENIERÍA EN LA CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN	51
7.1 DATOS DE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN.....	52
7.2 DATOS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LOS TESTIGOS.....	53
8. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RESERVAS	55
8.1 MÉTODOS BASADOS EN ESTADÍSTICA CLÁSICA.....	55
8.2 MÉTODOS CONVENCIONALES.....	56
8.3 MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS.....	58
8.4 SEMI-VARIOGRAMAS.....	58
8.5 KRIGING.....	59

<i>9. CONTRATACIÓN DE SONDEOS</i>	<i>61</i>
9.1 PRESUPUESTO POR METRO	62
9.2 PRESUPUESTO POR ADMINISTRACIÓN	63
<i>10. TENDENCIAS EN PERFORACIÓN</i>	<i>67</i>
10.1 PERFORACIÓN DIRIGIDA APLICADA A LA EXPLORACIÓN MINERA	67
10.2 INVESTIGACIÓN MARINA.....	70
10.3 Barco de Perforación	71
10.4 Planificación de la investigación marina	72
10.5 Perforación mediante equipos sumergibles.....	73
10.6 PERFORACIÓN EN AMBIENTES EXTREMOS.....	76
10.7 Trabajo en clima desértico	76
10.8 Trabajo en clima polar	77
10.9 Trabajo a gran altitud	78
10.10 TENDENCIAS EN ANÁLISIS DE TESTIGOS.....	80
10.11 Técnicas de reconocimiento de testigo.	80
10.12 Técnicas de análisis de muestras por XRF. Fluorescencia.....	82
<i>11. BIBLIOGRAFÍA</i>	<i>85</i>

1. PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA

1.1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos de explotación minera se pueden definir de manera conceptual como aquellos en los que se describe de manera detallada cada una de las fases necesarias para la extracción de los recursos minerales.

Para desarrollar dicho proyecto, 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, que nos 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.

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

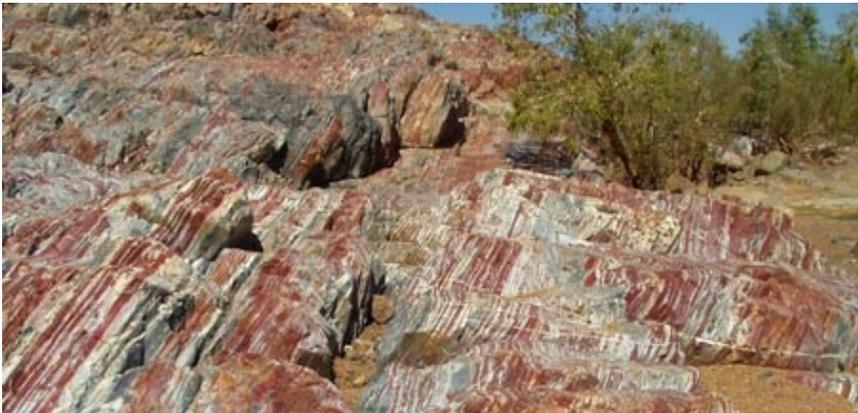
- **Indirecta**: por medio del estudio de parámetros inferidos, a partir de las propiedades de los minerales, de la roca encajante y del macizo rocoso.
- **Directa**: a través del estudio de las propiedades de muestras de minerales y rocas, bien a través del estudio de afloramientos, bien por el estudio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

En 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.



Prospección aérea

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.



Afloramiento en superficie (Fuente: Hiroshi Ohmoto - Sciencemag)

1.2 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, entendiéndose 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 cubicación 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. Anomalia - 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 <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudio del impacto de minería al medio ambiente 2. Infraestructura 3. Planta 4. Explotación 	2-5 años
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.

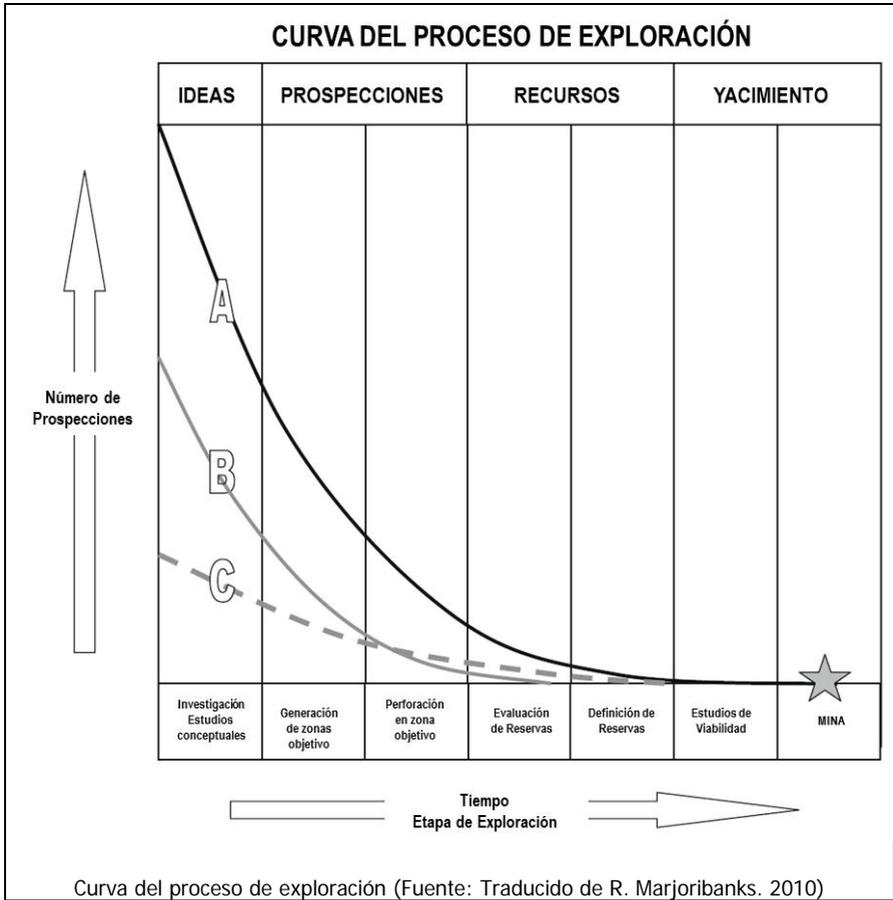
Por este motivo, durante la fase de prospección muchos de los datos obtenidos serán desechados tras confirmar la ausencia de materiales valorizables en su zona de influencia.

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.

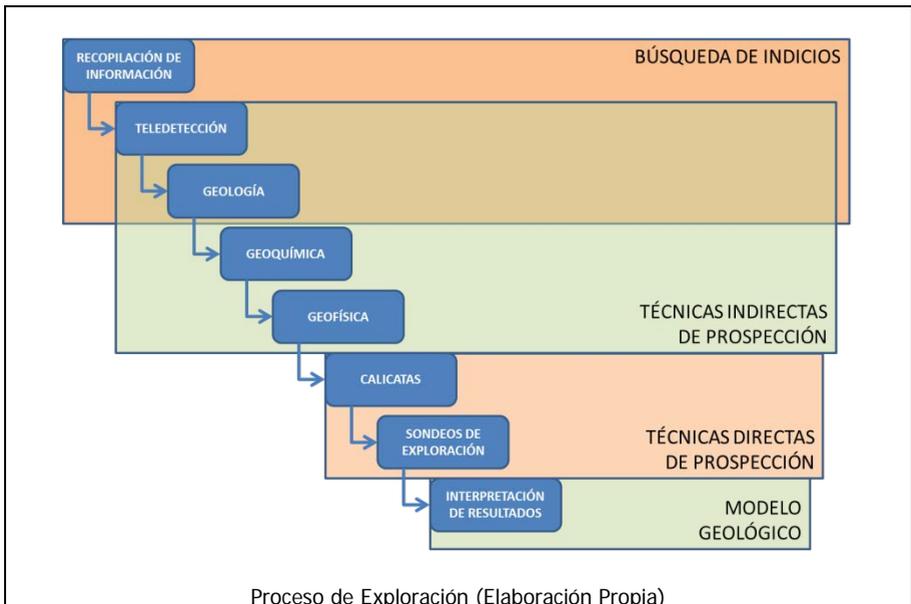


2. TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

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.



2.1 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.

2.2 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 hiperespectrales. En cambio, los sistemas Radar se pueden aplicarse tanto en satélites como en aeronaves. Los sistemas hiperespectrales 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 hiperespectral
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	-	-	

Sistema de Teledetección aplicables a la exploración minera (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 hiperespectrales 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 procesado 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.



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

2.3 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.

2.4 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.

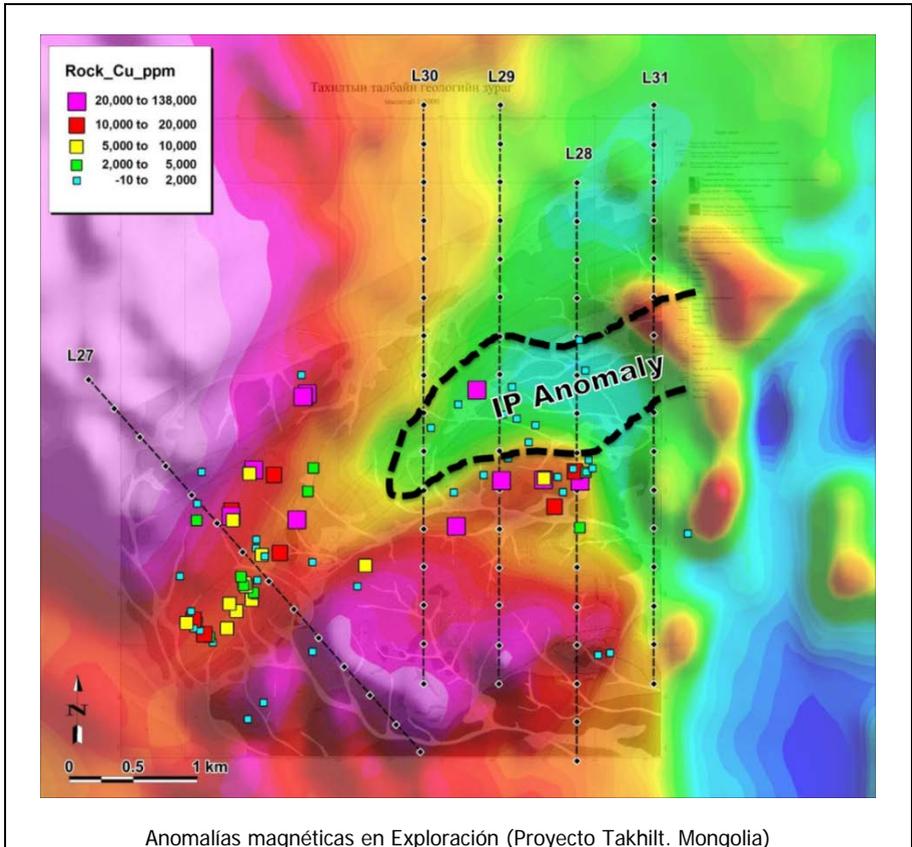
Las técnicas geofísicas y geoquímicas normalmente miden propiedades objetivas que tienen en mayor o menor medida todos los minerales y que dan lugar a gran cantidad de datos digitales referenciados geográficamente.

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.



Anomalías magnéticas en Exploración (Proyecto Takhilt. Mongolia)

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

2.5 CALICATAS

Cuando aun 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.

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.

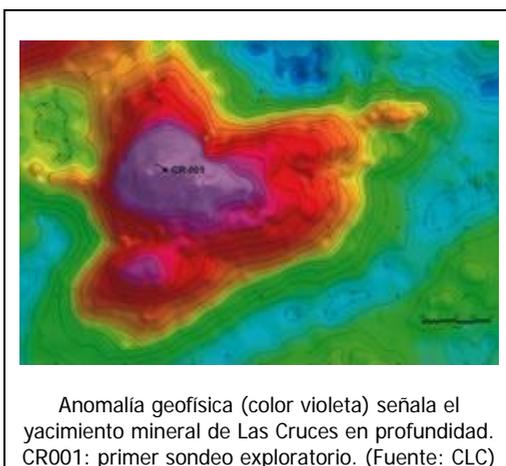
2.6 SONDEOS DE EXPLORACIÓN

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, entendiéndose 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

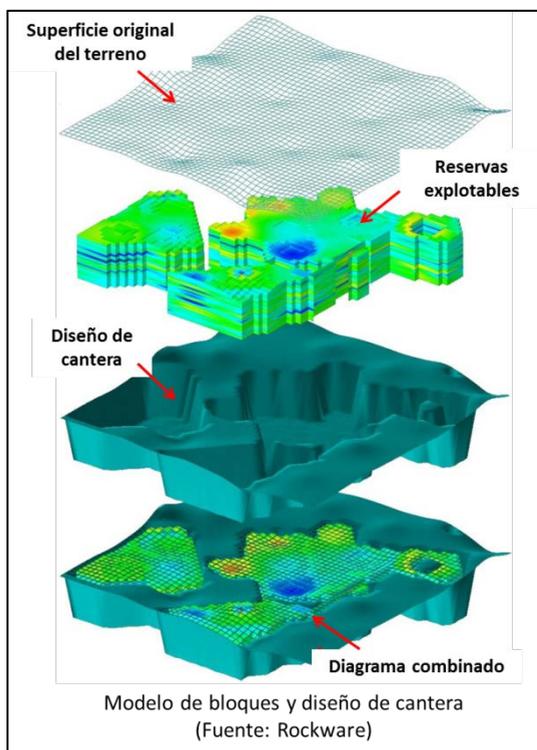
basarán interpretaciones posteriores que implicarán inversiones mucho mayores, como son el diseño de la futura explotación.

2.7 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 geostatísticas para su correcta interpretación.



3. TÉCNICAS DE PERFORACIÓN APLICADAS A LA EXPLORACIÓN MINERA

3.1 INTRODUCCIÓN

Hay un gran número de técnicas de perforación, pero, sin pretender ser un tratado de métodos de perforación, se van a describir los métodos de perforación más empleados en exploración minera. Estos métodos son: perforación a rotación con recuperación de testigo (perforación con corona de diamante), perforación a rotación y perforación a rotopercusión.

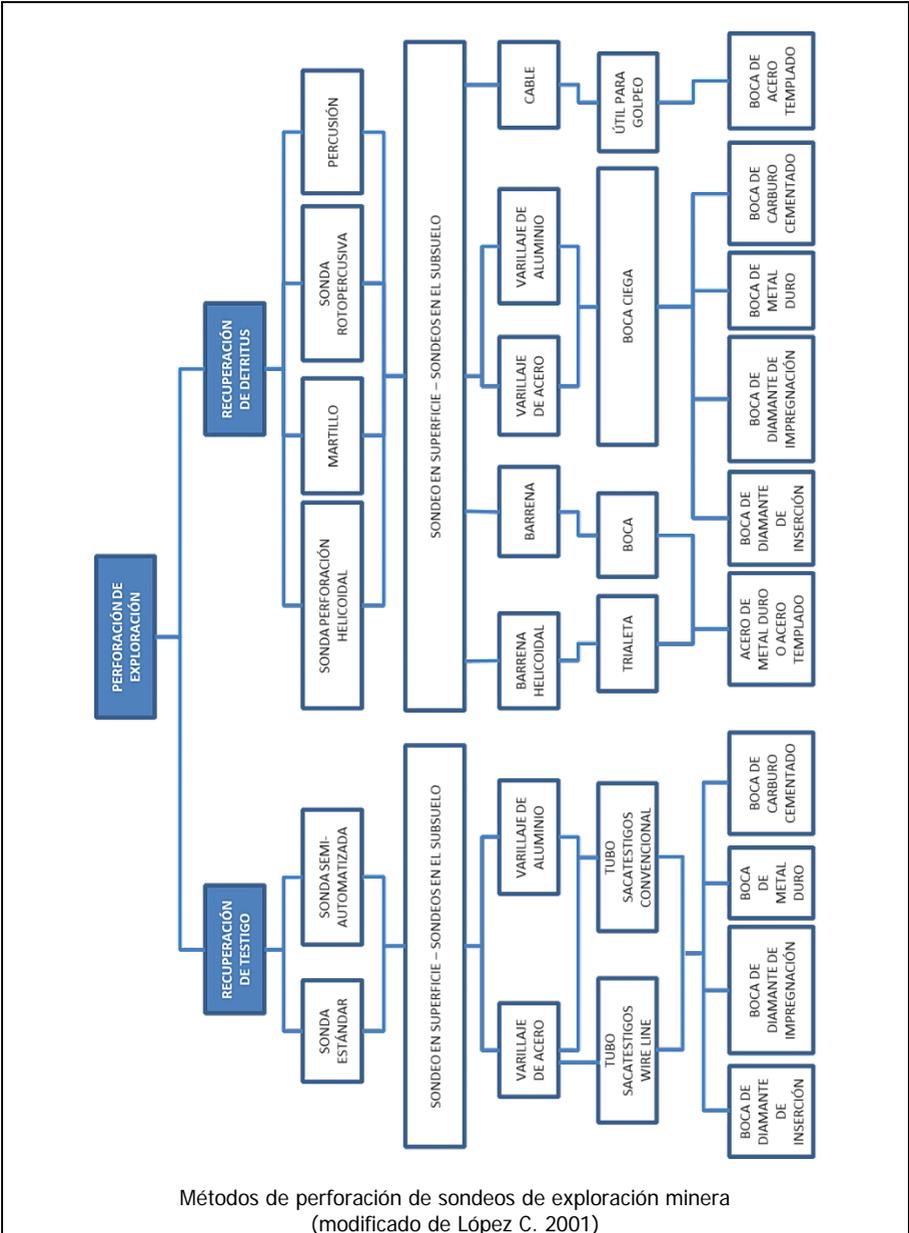
La elección del método de perforación requiere siempre llegar a un compromiso entre velocidad, coste y cantidad y calidad de la muestra a recuperar, además de aspectos logísticos y medioambientales.

Las técnicas de perforación aplicadas a la exploración minera son las siguientes:

- Perforación a rotación
- Perforación a rotopercusión
- Perforación a rotación con recuperación de testigo

Las técnicas más habituales son la perforación a rotación y la perforación a rotación con recuperación de testigo, siendo esta última la técnica que posibilita la obtención de muestras de roca para su posterior análisis.

De menor a mayor coste comparativamente, los métodos a rotación son los más baratos, seguido por la perforación a rotopercusión, siendo la técnica generalmente más cara la perforación con diamante.



Métodos de perforación de sondeos de exploración minera (modificado de López C. 2001)

3.2 PERFORACIÓN A ROTACIÓN

Los sistemas de perforación a rotación (Rotary Drilling, en inglés) se caracterizan por que la perforación realizada únicamente por la rotación del elemento de corte, sobre la que se ejerce un empuje desde el extremo del varillaje, con ausencia del elemento de percusión.

Por este motivo, este sistema es usado principalmente en formaciones rocosas blandas, que son perforadas a través del corte por cizalladura. La perforación rotativa es la más rápida, más barata y más sencilla de los métodos de exploración minera. Se obtiene un rendimiento óptimo en formaciones sedimentarias, llegando incluso a la centena de metros por relevo.

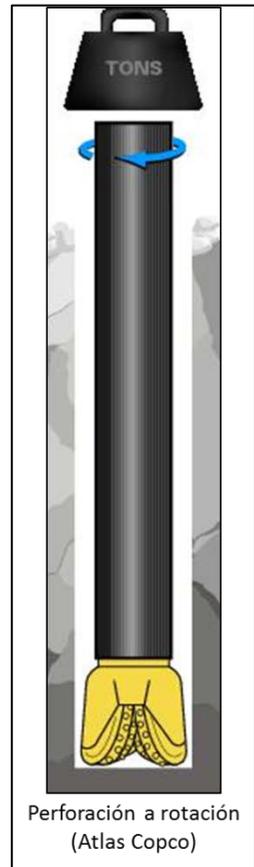
La rotación se genera por medio de un conjunto de motor y engranajes, llamado “cabeza de rotación” que además mueve hacia arriba o hacia abajo la sarta de perforación para proporcionar el empuje requerido sobre la boca de perforación.

El empuje aplicado a la boca a través de la tubería y de presión adicional, debe ser lo suficientemente poderoso como para que los dientes o insertos de la broca sobrepasen la resistencia a la compresión de la roca.

La limpieza del detritus de perforación es habitualmente realizada por aire comprimido. En perforación de mayor diámetro y longitud, para la extracción de petróleo y/o gas, esta limpieza se realiza con lodos de perforación.

Aunque algunas perforadoras rotativas vienen montadas sobre neumáticos en camiones para obras civiles o canteras, generalmente las mineras son montadas sobre chasis con orugas planas, dependiendo del uso y terrenos a los que se les vaya a destinar.

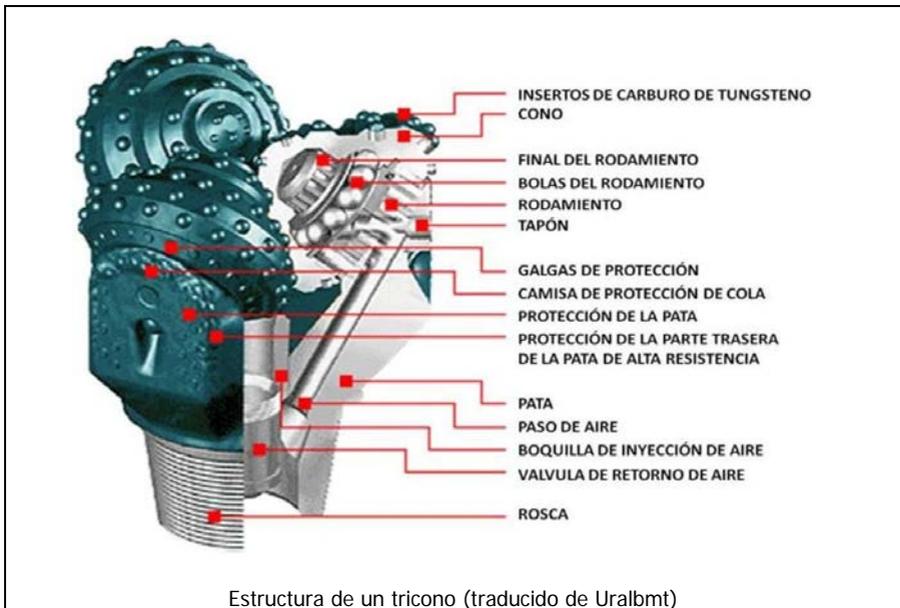
Las máquinas rotativas se componen de un cuerpo estructural, convertidor de corriente alterna a continua, generador, motor principal, compresor, motor hidráulico, motor del cabezal, motor de propulsión, equipo de empuje e izado y gatos niveladores.



En general, suelen presentar mayores dimensiones y suelen ser más complejos que los de percusión. Si se comparan, ambos coinciden en el tipo de plataforma (tráiler o semitráiler) normalmente con mayor número de ejes para mejor reparto del peso. El mástil, a veces de tipo telescópico, está constituido por una estructura metálica reforzada y es abatible y/o desmontable para el transporte. Además de los motores, cabrestantes, etc., suelen llevar montados sobre el chasis otros elementos mecánicos como bombas de lodos, compresor, etc., según las características de cada equipo. Pero en cambio, son claramente distintos los elementos que constituyen la sarta de perforación.

En la perforación por rotación se usa generalmente como elemento de corte el tricono, que tritura y desgarrar la roca.

Todas las máquinas mencionadas, se fabrican en muy diversos modelos que varían en peso, potencia, presión de trabajo, consumo de aire comprimido, etc. dependiendo del trabajo a que se les destine. Las marcas comerciales acreditadas en el mercado, son numerosas y los volúmenes de ventas que algunas de ellas alcanzan a tener en ciertas épocas, se debe a la introducción de innovaciones mecánicas o de eficiencia, ya que en principio, todas las máquinas y sus mecanismos de operación son muy parecidos en la mayoría de las marcas.



En condiciones buenas de perforación se suele utilizar el aire como fluido de limpieza. En formaciones difíciles puede usarse agua o lodos, pero la recuperación del detritus requiere equipos complementarios.

El detritus se recoge en ciclones para su posterior análisis. Por ejemplo, para un diámetro de perforación de 114mm se puede obtener un detritus de dimensiones entre 6 y 10 mm, lo que permite efectuar un reconocimiento geológico y mineralógico.

Las dos principales variantes del sistema de rotación son la rotación con circulación directa y la rotación con circulación inversa. La principal diferencia entre ambas radica en el sentido de circulación del fluido de perforación. No obstante, ya los modernos equipos de perforación a rotación suelen estar preparados para trabajar a varios sistemas (circulación directa o inversa, rotopercusión, rotación con aire), pudiendo de este modo adaptarse a las condiciones específicas de cada perforación.

Cuando el diámetro de una perforación es grande, la velocidad del fluido de perforación en el anular comprendido entre la pared del varillaje y el terreno, resulta muy pequeña e insuficiente para elevar el detritus o ripio a la superficie, haciendo lenta y peligrosa la perforación.

Para evitar esto se invierte el sentido de circulación del fluido de perforación, es decir, se le hace descender por el anular y retornar por el interior del varillaje, que además, es de mayor diámetro. Con ello se obtienen tres ventajas:

- Gran capacidad de extracción de detritus debido a la alta velocidad del fluido de perforación en el interior del varillaje.
- Pequeña cantidad de descenso del fluido de perforación por el anular, con mínimo efecto de erosión en las paredes del terreno, disminuido aún por tratarse de lodo limpio, sin partículas de detritus.
- Posibilidad de emplear (si la formación se sostiene) fluido de perforación (lodos) de baja densidad y viscosidad, puesto que la capacidad de arrastre del detritus está confiada a su alta velocidad en el interior del varillaje. Con estos lodos ligeros, que pueden llegar a ser agua limpia, no se corre el riesgo de impermeabilizar acuíferos de poca potencia o escasa presión.

La principal diferencia entre los equipos de rotación directa o los de rotación inversa es que, mientras los primeros utilizan una bomba de fluido de perforación (lodos), los segundos utilizan un compresor, que generalmente suele llevar su propio motor. En ambos casos, estos elementos suelen ir montados sobre el propio chasis de la máquina, aunque a veces, debido al tamaño de los compresores suelen ir en remolques independientes.



Equipo de perforación a rotación para exploración minera (Atlas Copco)

Otra diferencia entre la rotación directa y la inversa estriba en el varillaje, aunque en la circulación inversa las varillas que se utilizan por debajo de la cota de inyección del aire son comunes a las de circulación directa.

En cuanto a las herramientas de corte son iguales en la rotación directa y en la inversa, aunque adaptadas al particular tipo de circulación. Por ejemplo, a los triconos se les obturan los "jets", mientras que para la aspiración se abre un orificio central. Mientras que el problema más frecuente de la circulación directa es el emboce de las piñas del tricono por insuficiente limpieza, en la circulación inversa, el problema más frecuente es la obstrucción de la aspiración de cantos gruesos.

En sondeos poco profundos, el efecto de circulación inversa se puede provocar por aspiración, generalmente mediante bombas centrífugas, aunque en la práctica, su eficacia se ve limitada a unos seis metros. El efecto de "aspiración" se puede lograr de varios sistemas: utilizando un varillaje de doble pared o con conductos laterales, de forma que puede inyectarse aire a presión mediante un compresor. A una profundidad determinada se introduce el aire, mediante un sistema de válvulas, al interior del varillaje, que está relleno de agua o lodo. La inyección del lodo provoca un "aligeramiento" en la columna de lodo del interior del varillaje con respecto a la columna del anular, con la consiguiente diferencia de presión que induce un efecto

de "aspiración". De este modo el lodo asciende por el interior del varillaje, arrastrando el detritus de perforación hasta el exterior.

En perforación de sondeos de exploración, es habitual el uso de la circulación inversa, porque se obtiene una alta recuperación y menor contaminación de las muestras.

3.3 PERFORACIÓN CON MARTILLO EN CABEZA

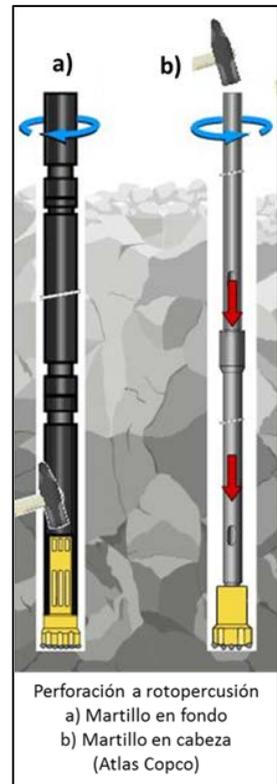
El método de perforación con martillo en cabeza (en inglés Top Hammer Drilling) es aquel en la que el martillo de perforación que genera la percusión está situado en el extremo de la sarta de perforación, situado sobre la deslizadera de la columna de perforación. Por tanto, la energía de impacto se transmite desde el martillo hasta la boca de perforación a través de toda la sarta de varillaje en forma de ondas de choque.

Este método es rápido para la perforación en roca en buenas condiciones. Tiene como inconveniente que la sarta de perforación sufre la percusión del martillo y además en la perforación de barrenos largos (>20m, aproximadamente) pueden surgir grandes desviaciones en la perforación.

3.4 PERFORACIÓN CON MARTILLO EN FONDO

En la perforación con martillo en fondo (Down the Hole Drilling, DTH), el martillo que proporciona la percusión está colocado en el interior del barreno, estando en contacto directo con la boca de perforación. De este modo el pistón del martillo transmite de manera más eficiente la energía al elemento de corte. Así, las pérdidas de energía son insignificantes a medida que se aumenta la longitud de perforación.

Este es el método más empleado para la perforación de barrenos largos (>20m), ya que se reducen las desviaciones en estos casos y se reduce también el desgaste de la sarta de perforación.



Este método puede usarse tanto en rocas competentes como en rocas más blandas.

Tiene como inconveniente que el diámetro mínimo de perforación debe ser mayor que en la perforación con martillo en cabeza puesto que debe haber espacio para alojar el conjunto de los elementos del propio martillo.

Las barras son tubos de sección circular con diámetro de 63,5 a 102 mm (2½" a 4") para bocas o elementos cortantes entre 76,2 a 152,4 mm (3 a 6") Se caracterizan por conseguir una velocidad de penetración más constante que el martillo en cabeza.

3.5 PERFORACIÓN A ROTACIÓN CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO

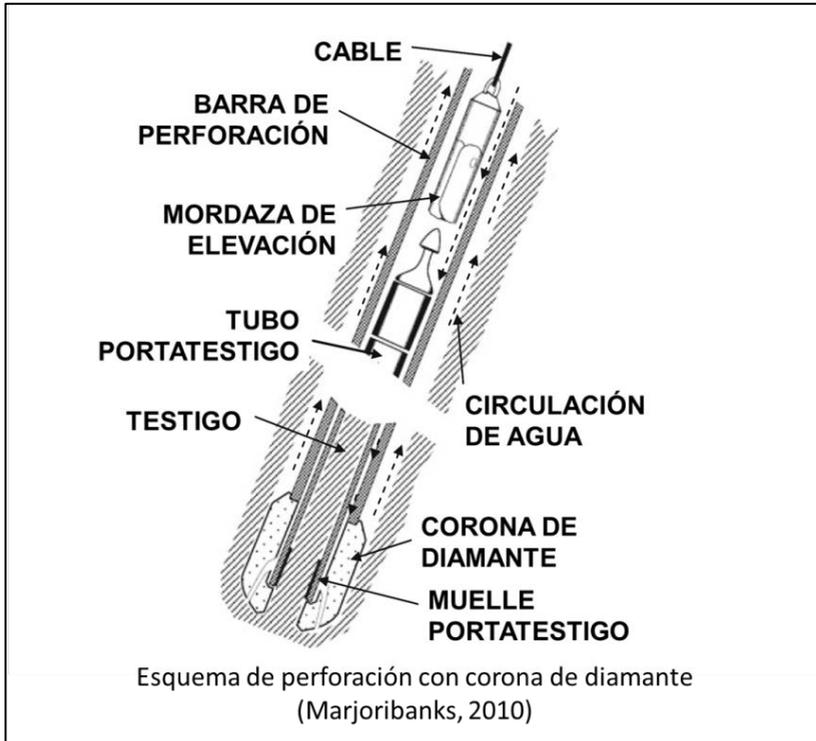
En todo proceso de exploración existe un punto en el que después del estudio realizado con métodos indirectos prospección es necesaria la verificación de éstos mediante la toma de muestras de roca en profundidad. Esta toma de muestras se realiza por medio de los sistemas de perforación con recuperación de testigo.

Los testigos son las muestras del macizo rocoso que nos van a permitir un análisis directo de los diferentes materiales que atraviesa, así como la presencia de mineralizaciones, para estudiar su potencial explotación.

La perforación a rotación con recuperación de testigo se basa en que un elemento de corte de forma anular, con diamantes industriales incrustados colocado en el extremo de una sarta de perforación, "corta" la roca obteniendo un cilindro de roca que se aloja en el interior de la sarta, a medida que el elemento de corte avanza. El elemento de corte se denomina corona de diamante.

La perforación con coronas de diamante y recuperación de testigo es, generalmente, el método de perforación más útil de cara a la obtención de muestras para su análisis, inspección visual y ensayo, particularmente en depósitos masivos de leyes bajas donde la mineralización se distribuye a través de la roca matriz.

Sin embargo, la recuperación de los testigos es baja en las zonas mineralizadas superficiales debido a la fracturación, meteorización o friabilidad del material, siendo entonces necesario recoger muestras procedentes del fluido de perforación, incrementándose los costes.



En la perforación con diamante el agua es el fluido de perforación más usual, aunque el aire es usado en algunas ocasiones con éxito. En ocasiones también se usa una mezcla de agua y lodo. El agua se bombeada por el interior de la sarta de perforación hasta alcanzar la corona de diamante, saliendo por el espacio anular entre la sarta de perforación y la roca. En la superficie, el agua de retorno suele ser recogido en un tanque donde se decanta el contenido de finos en suspensión procedentes del detritus de perforación. Una vez decantado, el agua puede ser recirculado de nuevo.

El testigo recuperado se aloja en los denominados tubos sacatestigos (o portatestigos), que permiten su desmontaje en el exterior para una mejor maniobrabilidad del mismo. Para la extracción de los núcleos de roca se han desarrollado tubos sacatestigos de diferentes características que han permitido mejorar la recuperación en terrenos difíciles. En los sondeos profundos el sistema "Wireline" ha posibilitado la extracción de testigos sin extraer todo el varillaje en cada maniobra.

El testigo entra en el tubo interior (portatestigo), situado dentro del tubo de sarta de perforación inmediatamente detrás de la corona de perforación. Se evita que el testigo caiga de nuevo en el barreno por medio de un casquillo en forma de cuña montado en la base de la sarta, llamado muelle rompetestigo o portatestigo. La longitud de las barras es normalmente de hasta 6 metros de longitud, dependiendo del tamaño del equipo de perforación. Cuando la barra está completa con testigo en su interior, el tubo portatestigo se extrae de la sarta, por medio de una mordaza que se baja por el interior de la sarta hasta que “pesca” anclándose a un dispositivo con forma de arpón. Este es el denominado sistema wireline. En esta posición la barra portatestigos queda liberada y una vez en el exterior el testigo puede extraerse fácilmente gracias a que esta barra suele poder desmontarse longitudinalmente, siendo especialmente útil en el caso de testigos altamente fracturados o alterados. Una vez extraído el testigo se monta de nuevo y se desciende de nuevo hasta la corona de perforación.



Operación de extracción de testigo (Atlas Copco)

La perforación con coronas de diamante es relativamente lenta y costosa, consiguiéndose rendimientos de 15 a 20m por relevo en buenas condiciones. En cuanto al coste, como regla general, puede decirse que el precio de un metro perforación con corona de diamante equivale a perforar hasta 4 metros de perforación con circulación inversa y hasta 20 metros de perforación a rotación.

La perforación con corona de diamante permite realizar sofisticados estudios

geológicos, e incluso se pueden obtener gran volumen de muestra para evaluaciones geoquímicas. El testigo puede ser orientado permitiendo la medida de las estructuras geológicas, reproduciendo la posición del testigo en el macizo rocoso.

Los tamaños de testigo estándar van desde 27 mm a 85 mm de diámetro. Los diámetros de testigo usados normalmente con el sistema wireline son: AQ (27 mm), BQ (36,5 mm), NQ (47,6 mm), HQ (63,5 mm) y PQ (85 mm).

Desde casi todos los puntos de vista, el mejor tamaño de testigo es el mayor posible. Mayores diámetros permiten mejor grado de recuperación y permiten menores desviaciones en la perforación. En testigos de mayor tamaño se facilitan los ensayos geoquímicos y los cálculos de estimación de reservas. Sin embargo, el coste de la perforación con corona de diamante crece exponencialmente en relación al tamaño de testigo, por lo que hay que llegar a una solución de compromiso entre diámetro y coste



Coronas de diamante para recuperación de testigo (Sandvik)



Testigo de roca (ABRA Mining)

3.6 **PERFORACIÓN A ROTOPERCUSIÓN**

El sistema de perforación a rotopercusión se basa en que la perforación se logra a través de la combinación de aplicar a la sarta de perforación un empuje y una rotación, junto con una percusión, logrando así una mejor fragmentación de la roca.



Equipo de perforación a rotopercusión (Sandvik)

Esta técnica es aplicable en investigaciones en las que los cuerpos mineralizados están próximos a la superficie o en ciertas zonas donde exista un recubrimiento difícil para cualquiera de otros métodos de perforación (perforación con diamante o perforación a rotación) y sea necesario atravesar esa formación para después proseguir con otro de los métodos (recuperación de testigo o perforación con tricono). Este sistema tiene el inconveniente de que no se puede extraer testigo continuo.

En sondeos superficiales los métodos de perforación pueden ser con martillo en cabeza o bien martillo en fondo. A partir de 20-30m es habitual el uso de martillo

en fondo. En ambos casos el detritus se tiene que recoger en ciclones y captadores de polvo, introduciéndolos en bolsas de plástico para su posterior análisis. Los equipos de perforación son los diseñados para la perforación de barrenos de voladura, con chasis adaptados a cada caso.

4. CAMPAÑAS DE EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN

Una de las decisiones más difíciles en el proceso de exploración es decidir cuándo empezar la campaña de exploración 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.

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 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.



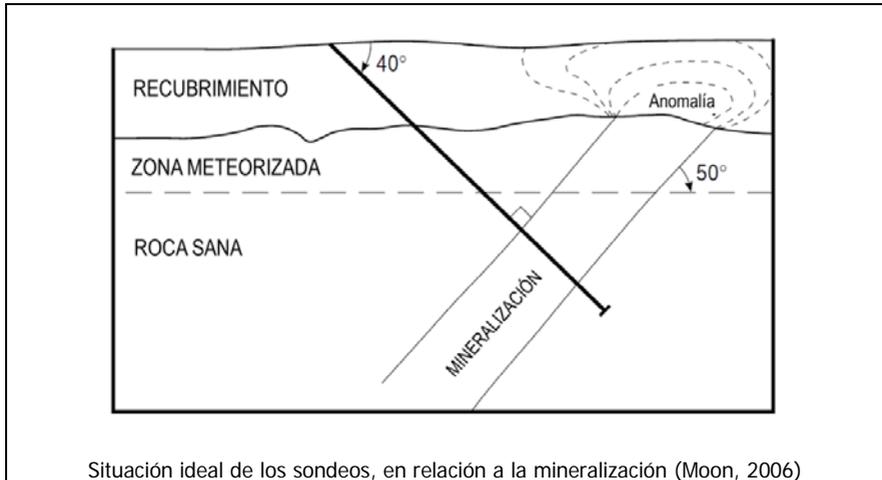
Campaña de exploración en zonas aisladas

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.

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 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.

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 rotoperusión, 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 este 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.

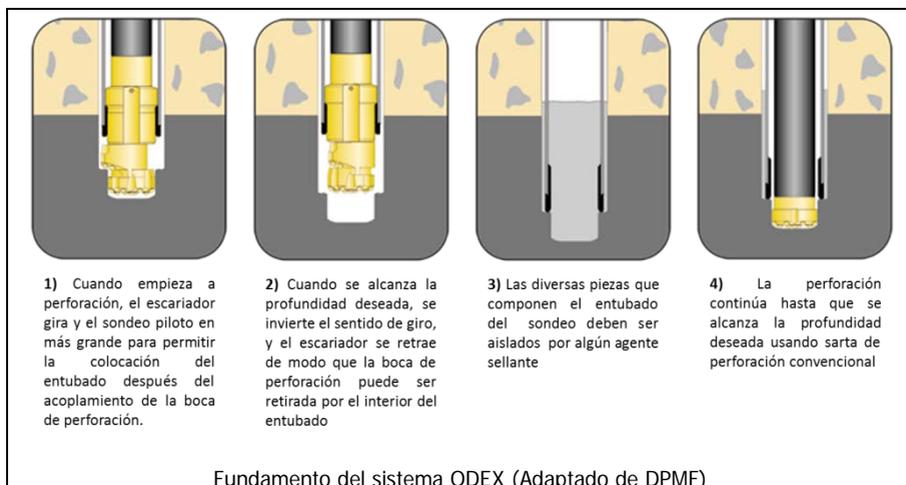
- El cuerpo mineralizado es de ley explotable y se ha definido el yacimiento con suficiente precisión.
- Se ha acabado el presupuesto.

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.

4.1 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.

Un problema frecuente aparece a la hora de atravesar los materiales de recubrimiento alterados. Es necesario revestir el sondeo y es usual emplear técnicas de perforación y entubado simultáneo (ODEX-Overburden Drilling with Eccentric Drilling)



4.2 PERFORACIÓN SUBTERRÁNEA

Los sondeos realizados desde labores subterráneas pueden ser:

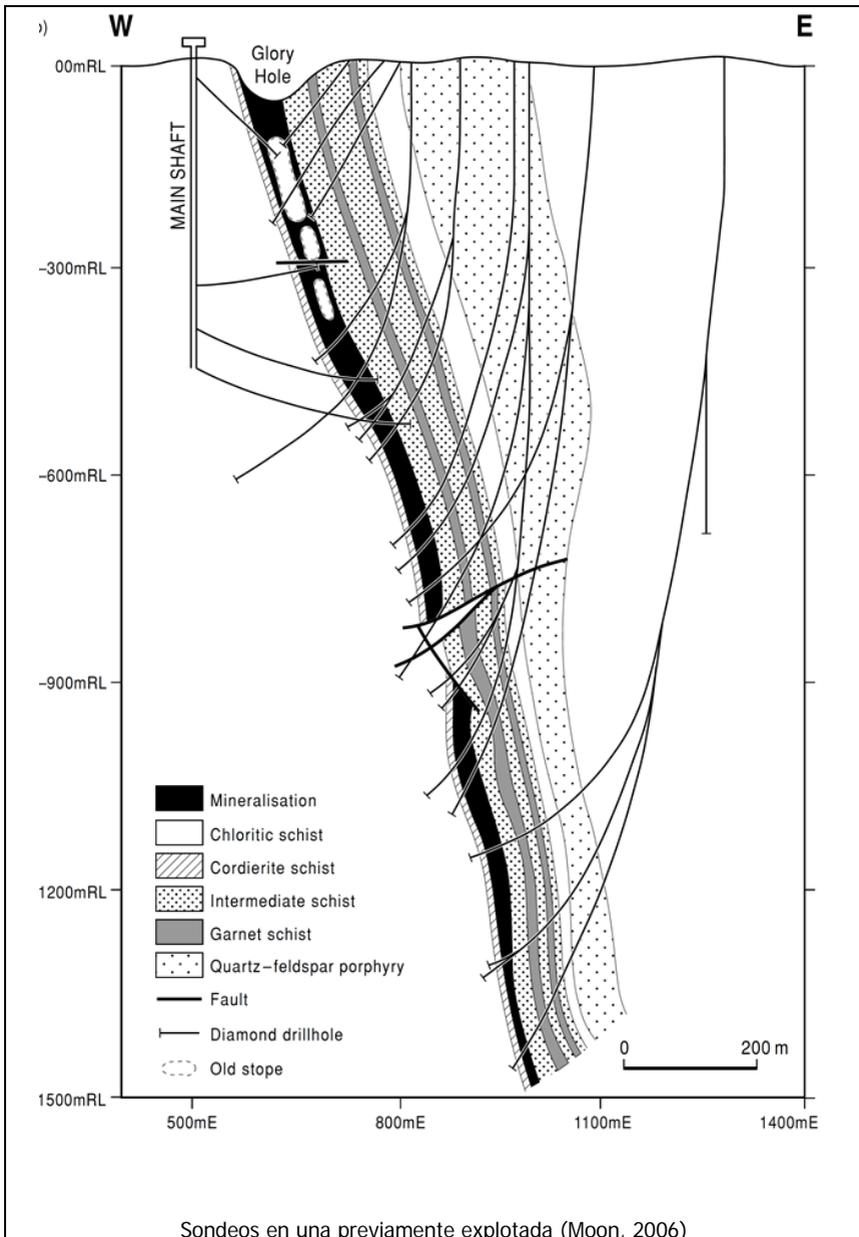
- Verticales
- Inclinaados
- Horizontales

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.



5. 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 depósito filoniano, 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.

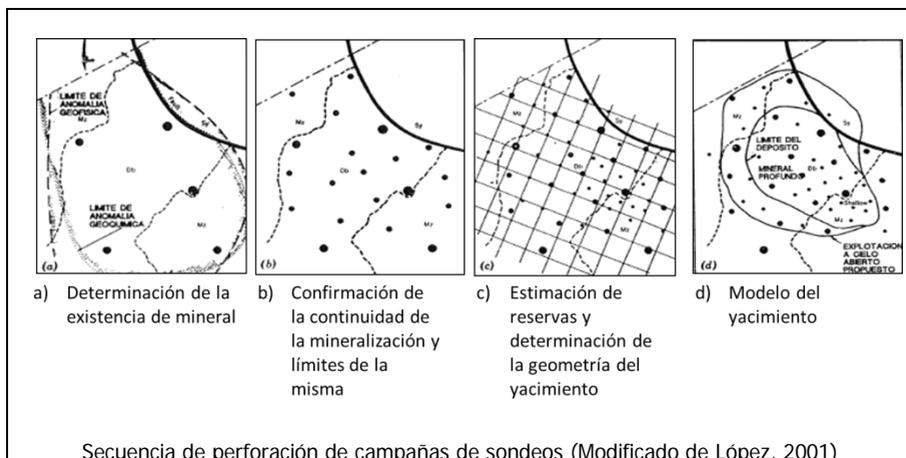
Los espaciamientos de malla utilizados generalmente (y para que sirvan de referencia) en la investigación de diferentes tipos de yacimientos se muestran en la tabla adjunta.

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.



6. 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

6.1 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.



6.2 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.

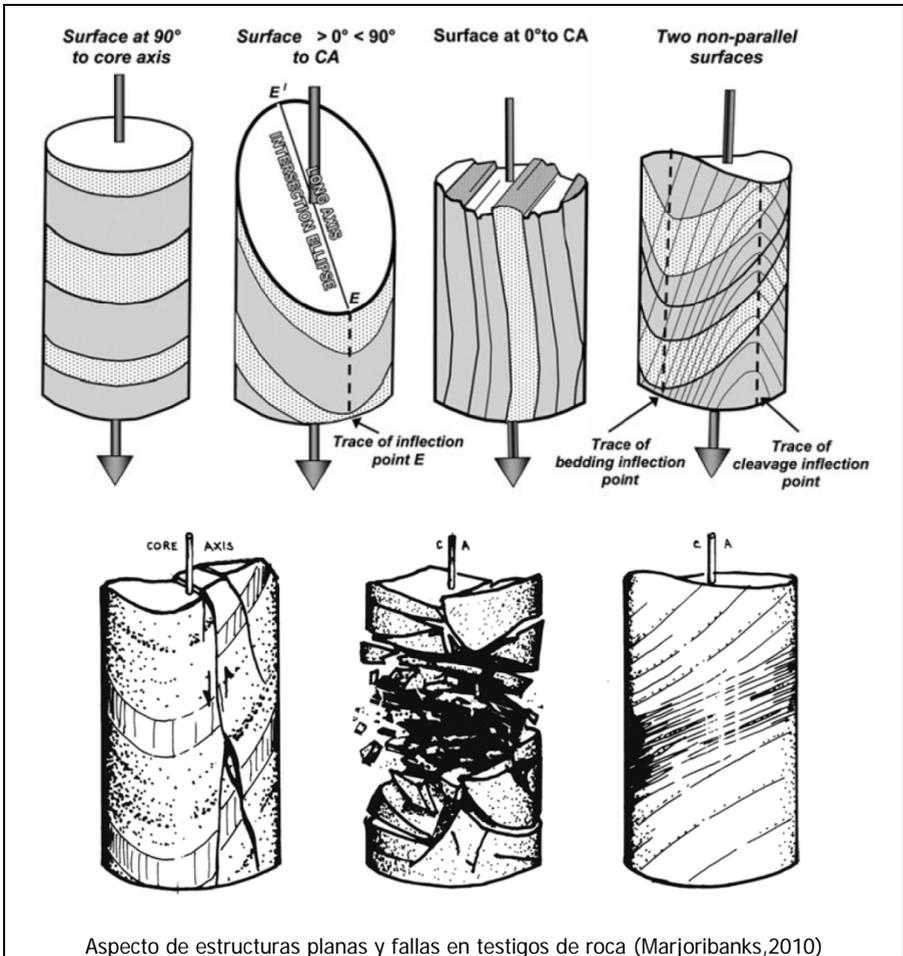


La traza de una estructura plana (como juntas o filones,) en la superficie de un testigo cilíndrico, aparece como una elipse. Cualquier elipse puede ser definida por la longitud de su eje mayor, su eje menor y el ángulo entre ambos. De este modo, se puede referenciar estos datos con la orientación del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

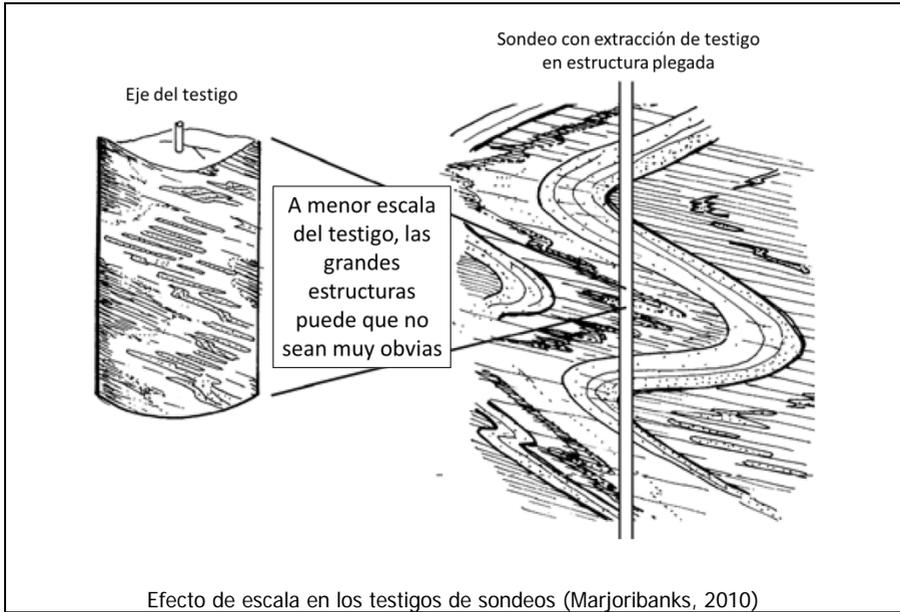
En ocasiones el testigo se presenta de aspecto frágil, o incluso hay zonas de poca o nula recuperación de testigo. Estas pueden ser debidas a zonas más frágiles del macizo rocoso, como presencia de intercalaciones de arcilla, o ser indicativo de zonas de fluencia de agua, o alteraciones anómalas en profundidad.



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, espaciamientos 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.



6.3 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.



Sierra de disco para testigos de roca (Fuente: Strength Int. y E.A. Minerals)

7. LABORES DE INGENIERÍA EN LA CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN

Toda campaña de exploración, deberá ser supervisada y controlada en todo momento por un técnico cualificado y con experiencia, de acuerdo a lo descrito en el pliego de condiciones correspondiente que debe acompañar a todo proyecto de ejecución.

La labor general del técnico competente, en esta clase de trabajos, consiste en:

- La dirección y supervisión del trabajo, en la que debe tomar las decisiones oportunas en cuanto a las incidencias surgidas durante la realización del mismo.
- Testificación. En la fase de ejecución de la perforación, el técnico competente debe llevar a cabo la testificación del sondeo mediante: la descripción del material que se esté extrayendo, bien sea proveniente de detritus o testigo; la toma de datos tales como la velocidad de la sonda en la perforación, descripción de incidencias, pérdidas de agua en el proceso, etc.; la selección de muestras que serán enviadas al laboratorio para su posterior análisis. Ha de destacarse que, en muchos de los casos, esta labor de testificación se realiza en el laboratorio, usando la información que toma la empresa contratista de sondeos, ante posibles incidencias.

Los trabajos de perforación y testificación se realizan para determinar in situ las condiciones del suelo o del macizo rocoso. Cualquier incidencia, pérdida de testigo o daños debidos al tipo de trépano, sarta, o cualquier otro equipamiento usado, o bien el uso de técnicas inadecuadas usadas en la campaña de exploración tiene que ser anotado.

Esos factores pueden tener un efecto notable sobre la cantidad y condición del núcleo recuperado, particularmente en zonas de terreno de mala calidad, meteorizado, o intensamente fracturado.

Los registros geológicos requieren una descripción adecuada de los materiales atravesados, equipo de perforación, tomamuestras y condiciones geotécnicas, además de interpretaciones geológicas.

Los registros completos de los sondeos requieren una descripción adecuada de los depósitos minerales y de la roca encajante, un sumario detallado de los métodos y condiciones de perforación y unas características físicas de la roca, así como parámetros necesarios para asegurar la mejor interpretación geológica y el mejor análisis posible.

Se suele realizar un registro diario de las operaciones realizadas donde se registrarán todas las incidencias y detalles de cada sondeo. A continuación se indican los parámetros que pueden medirse para una correcta supervisión de la campaña de exploración en función de cada una de las operaciones realizadas.

7.1 DATOS DE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN

Al comienzo de todo registro deben figurar los datos de identificación del proyecto, características del proyecto, y además:

- Número de sondeo (código de identificación)
- Ubicación.
- Coordenadas.
- Altitud.
- Rumbo.
- Ángulo de perforación.
- Fecha de comienzo del sondeo.
- Fecha de finalización del sondeo.
- Datos de la empresa perforista, así como de los operarios.
- Datos de la máquina empleada.
 - o Marca y modelo de máquina empleada.
 - o Barras y tubos portatestigo.
 - o Trépano de perforación.
 - o Sarta de perforación.
 - o Equipo de análisis de agua.
- Sistema de perforación y condiciones de trabajo
 - o Método de perforación
 - o Condiciones de trabajo: ritmo de trabajo, avance obtenidos,...
 - o Comentarios del perforista: problemas ocurridos, cambios de ritmo de perforación, sobrepresiones del equipo, atranques... A este respecto frases como "sin problemas" o "perforación normal" no son útiles para interpretaciones posteriores, mientras que una información más detallada puede dar información sobre cambios de litología capas de gran dureza, o intercalaciones más blandas, como presencia de arcillas, por ejemplo.

- Fluido de perforación: tipo de fluido, composición y aditivos empleados
- Retorno del fluido: porcentaje de fluido recuperado.
- Color del fluido de perforación en el retorno.
- Presencia de cavidades: profundidad de la cueva e intervalo atravesado.
- Entubado
- Cementación empleada.
- Tipo de terminación del sondeo. Se debe indicar cual ha sido en las que se deja el sondeo cuando se ha terminado.
- Razón por la que se ha dado por terminado el sondeo. Indicar si se ha llegado a la profundidad, objetivo o bien se ha dejado de seguir perforando por cualquier otro motivo.
- Tiempo de perforación. Se debe reflejar el tiempo que ha llevado la construcción del sondeo, que puede obtenerse desde los datos del contratista. Este dato es clave en la determinación de los costes de ejecución.

Sería conveniente proporcionar tanto las coordenadas del sondeo como de la estación de referencia. El ángulo de perforación puede expresarse con respecto a la vertical o con respecto a la horizontal, por lo que deberá indicarse la referencia utilizada. También se deberá reflejar la profundidad a la que se ha encontrado roca sana, así como los niveles en los que se ha encontrado presencia de agua.

7.2 DATOS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LOS TESTIGOS

Respecto a las características reseñables que pueden registrarse durante las labores de perforación de sondeos se encuentran las siguientes:

- Datos sobre el nivel de presencia de agua. Pueden anotarse la profundidad (o altitud) de los niveles de aparición, caudal y presiones de pozos artesianos. También deben registrarse cada uno de los datos anteriores durante el avance del sondeo, al comienzo y al final del turno, etc.
- Ensayos realizados. Longitud de muestra analizada y ensayo (por ejemplo ensayo SPT).
- Columna litológica obtenida
- Tipo de roca
- Litología. Composición, tamaño de grano, textura, color.
- Meteorización y alteraciones observadas.
- Textura.
- Exfoliación y bandeo reconocible.
- Dureza.
- Discontinuidades. Incluyendo juntas, fracturas y contactos entre

formaciones. Se debe asignar los cambios de propiedades a la profundidad en la que se han observado. Igualmente se describirán parámetros físicos como espaciamiento y orientación respecto a la generatriz de sondeo. Además es importante detallar el relleno existente entre las familias de juntas.

- Pérdidas de sondeo. Indicar las zonas de baja recuperación de testigo, así como el grado de recuperación.

Parte de estos datos se obtendrán directamente a pie de sondeos mientras que otros se pueden obtener una vez procesados los sondeos en laboratorio.

Las labores de catalogación y archivo de los testigos de roca obtenidos se hará de manera continua usando las cajas portatestigos de modo que no se pierda información o ésta se confunda para lograr una información menos contaminada y que sea más fácil de llevar a cabo los trabajos de interpretaciones geológicas posteriores.

8. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RESERVAS

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.

8.1 MÉTODOS BASADOS EN ESTADÍSTICA CLÁSICA

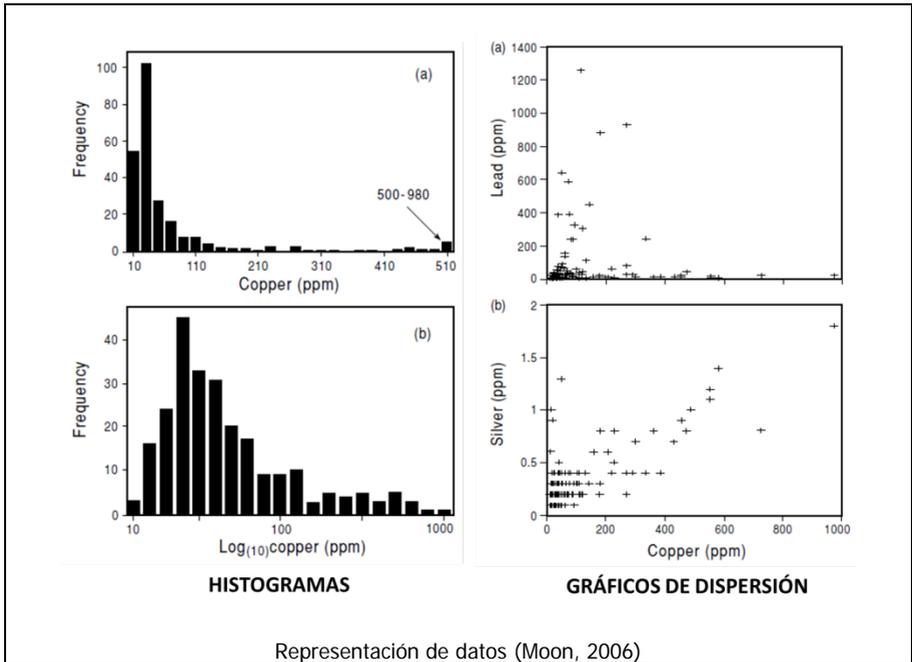
Unos de los métodos de estimación de reservas empleados son aquellos que se basan en el uso de estadística básica para su definición. El uso de estos métodos generalmente está restringido a una estimación global del volumen o ley que comprende el depósito mineral.

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.



8.2 MÉTODOS CONVENCIONALES

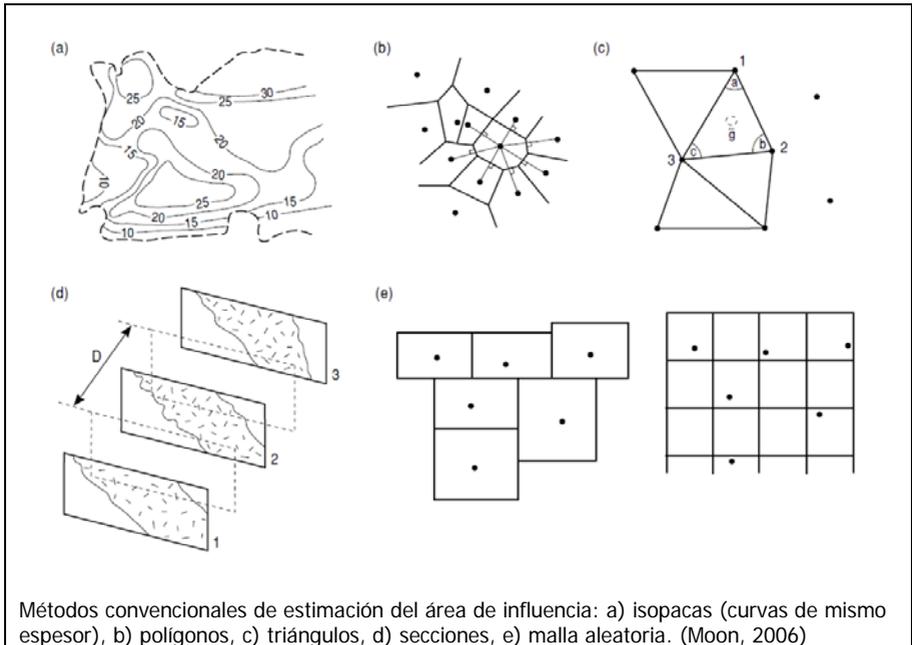
En el cálculo de los recursos o reservas potenciales de un determinado depósito mineral una de las fórmulas ampliamente usadas es:

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

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.

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.

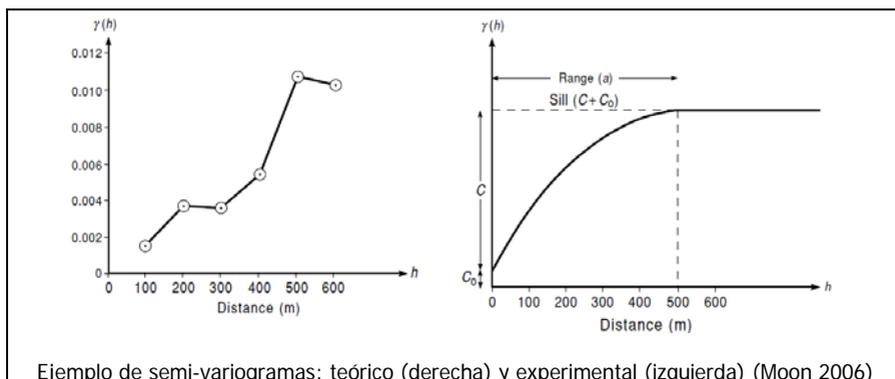
8.3 MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS

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.

8.4 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.



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.

8.5 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.

9. CONTRATACIÓN DE SONDEOS

Existen una gran variedad de factores que afectan al desarrollo y resultado final del sondeo. Algunos de estos factores pueden ser relativamente bien conocidos de manera que su incidencia en el desarrollo del sondeo puede ser prevista. Sin embargo no ocurre lo mismo para otros factores que quedan siempre sometidos a imponderables.

Esta incertidumbre afecta, como es lógico, al sistema de contratación de un sondeo.

Se pueden definir varios tipos de contratación para sondeos de investigación, pero principalmente se pueden considerar los siguientes:

- **Precios unitarios.** Definiendo las distintas unidades en que se puede dividir la totalidad del sondeo y estableciendo precios unitarios para cada una de ellas.
Las unidades principales a considerar serían, traslados de llegada y retirada, traslados entre puntos para nuevos sondeos, metros a perforar y metros de tuberías de distintos diámetros, agua para fluidos de perforación, horas de parada para pruebas, testigos, etc.
Este tipo de contratación es aconsejable cuando no se conoce bien la zona a perforar principalmente condiciones geológicas e hidrogeológicas, sin embargo la dificultad del programa técnico no debe ser grande (no grandes profundidades).
- **Tanto alzado.** Fijando un precio global para la realización del sondeo, no considerándose generalmente la realización de pruebas y ensayos.
Normalmente esta forma de contratación se da para sondeos en donde se conoce a priori bien las características de los terrenos a perforar.
- **Administración.** En este caso se definen los traslados, montajes, horas de funcionamiento con distintas tarifas que corresponden al tiempo empleado según las actividades que se realicen, horas de parada imputables en cierta medida a reparaciones y a pruebas o ensayos. Por tanto con excepción de los traslados, montajes y desmontajes se paga por horas.

Este tipo de contratos se firman para sondeos profundos en donde no existe un buen conocimiento de los terrenos a perforar.

Si exceptuamos el segundo tipo de contratos, poco habitual, se tiene pues los dos modelos tradicionales conocidos por contratación por metro y contratación por administración.

Ello da lugar a dos tipos de presupuestos diferentes que se van a analizar posteriormente.

Son muy diversos los factores que van a influir la preparación de uno u otro tipo de presupuesto y trabajo, pero se pueden resumir en los siguientes:

- Profundidad de investigación, por lo tanto tipo de maquinaria.
- Conocimiento contrastado de la geología del lugar.
- Número de sondeos realizados hasta la fecha en la zona.
- Acabados y ensayos que se desean realizar.
- Etc.

Como norma general se puede decir que los sondeos hasta 700-800 metros se pueden contratar por metro, mientras que los sondeos de profundidad superior o de dificultades especiales se pueden contratar por administración.

9.1 PRESUPUESTO POR METRO

A continuación se presenta el esquema de las unidades de precio que se utilizan habitualmente en este tipo de sondeos:

1. TRASLADO INICIAL Y RETIRADA FINAL. Incluye el movimiento de todo el equipo con materiales auxiliares, desde la base Q. la zona de trabajo, con personal de trabajo y montaje.
2. TRASLADOS ENTRE SONDEOS. Para campañas de varios sondeos. El importe suele depender de la distancia entre sondeos.
3. PERFORACION DE METRO DE SONDEO. Se suele establecer tarifas por tramos de 100 metros. No obstante para rotopercusión la tarifa suele ser común para toda la profundidad.
4. PRECIO DE HORA DE EQUIPO EN UTILIZACION. Existen labores que no se someten a precio cerrado como puede ser: cementaciones, entubación, reperfusión, ensayos, etc. En estos casos se contrata por administración.

5. PRECIO DE HORA DE PARADA. Cuando por causas ajenas a la empresa perforadora el equipo deba estar inactivo: fraguado de cemento, espera de materiales, espera de Órdenes, medidas en el sondeo, etc.

Existen después una serie de labores que son a cargo del propietario del sondeo: permisos y pagos de ocupación, accesos, obra civil, incluido emplazamiento y balsas, suministro de agua, tubería de revestimiento, etc. Algunas de estas partidas pueden ser gestionadas por el contratista que posteriormente pasa el cargo al propietario.

En el precio de perforación por metro va incluido todo el material fungible. En el caso del lodo de perforación está incluido un lodo bentonítico normal o la mezcla de agua y taladrina. Si se deben emplear lodos especiales; los productos requeridos son suministrados por el propietario. Los precios ofertados no incluyen nada sobre control o toma de datos del sondeo. Es habitual una toma de ripio cada metro, y una descripción muy "grosso modo" y "versión sondista" de los terrenos atravesados. En el caso de testigo generalmente las empresas facturan separadamente el valor de las cajas porta-testigos.

9.2 PRESUPUESTO POR ADMINISTRACIÓN

En estos casos el propietario o cliente corre a cargo de todos los gastos existentes en el sondeo. Paga un alquiler por la prestación y mantenimiento del equipo de perforación y el personal de la máquina. Este es el caso aplicable a sondeos profundos.

Dada la complejidad de este tipo de contrata se presenta a continuación un modelo de los más completos posible relativo a una perforación de 2000 metros de profundidad. En cada caso concreto este contrato sufriría cambios.

ACCESOS. EMPLAZAMIENTO Y RESTITUCION

- Accesos.
Prolongación de posible camino existente con relleno de zahorra y posterior compactación, mantenimiento.
- Plataforma.
Desbroce y retirada de recubrimiento con un espesor de 0,30 m. Regulación del terreno. Relleno con zahorra para firme de plataforma con espesor de 0,30 m. Desagües.
- Antepozo o sótano (si fuera necesario).

Excavación de antepozo. Encofrado de muro de antepozo y hormigonado. Hormigón en soleras niveladas. Canaletas de hormigón.

- Balsa de lodos.
Excavación de una balsa para lodos y residuos.
- Restitución y tratamiento de lodos
Se debe realizar un tratamiento químico para la decantación de los lodos de perforación, solidificación de los mismos y recubrimiento de las balsas y retirada de escombros.

MÁQUINA DE PERFORACIÓN

- Traslado, montaje y desmontaje
Partida alzada estimada según datos de otros sondeos.
- Perforación
Precio medio, en €/día, en función de la tarifa para cada tipo de operación.
- Triconos
Consumo de triconos según la previsión que se haya realizado en el programa correspondiente

PRODUCTOS DE LODOS

- Según las previsiones de productos, establecida en el programa correspondiente.

TUBERIAS, FILTROS Y ACCESORIOS

- En base a los precios existentes en el mercado y en el programa evaluado en el proyecto de sondeo se especifica por diámetros.
 - o Casing 20"; Casing 1"; Casing 7"...
 - o Filtros especiales y accesorios entubación y cementación
 - o Cabeza de pozo
 - o Etc.

CEMENTACIONES, CEMENTOS Y ADITIVOS

- Se separa lo que sería productos de cementación y la operación propiamente dicha

COMBUSTIBLES

- Se estima para esta partida un tanto alzado en base a lo gastado en otros sondeos realizados en la zona y a la evolución de precios.

CABINA GEOLOGICA

- Se incluye el alquiler de la cabina con toda la instrumentación.

CONTROL DE LODOS

DIAGRAFIAS

- El presupuesto de digrafías se elabora en base al programa proyectado y una consulta presupuestaria a las compañías de servicios.

DESARROLLO DE POZO

- Se suele incluir una partida alzada, estimada en función de los datos de costes de anteriores sondeos

PRUEBAS DE PRODUCCION

- Se suele incluir una partida alzada, estimada en función de los datos de costes de anteriores sondeos.

SUPERVISION GEOLOGICA

- Se factura también diariamente y supone la prestación de 24 horas de control.

SUPERVISION PERFORACION

- Se factura también diariamente y supone la prestación de 24 horas de supervisión.

NOTA: A veces estas dos últimas partidas no se incluyen porque las realiza el propietario directamente.

IMPREVISTOS Y VARIOS

- Se asigna una partida que se valora como el 10% de todo lo anterior, e incluye: aduanas, transportes, grúas, permisos, licencias, etc., etc.

10. TENDENCIAS EN PERFORACIÓN

En este capítulo se detallan las tendencias que actualmente se están implantando en la perforación de sondeos de exploración y en el desarrollo de campañas de exploración, si bien, son tecnologías que llevan tiempo desarrolladas, la aplicación de las mismas a la exploración minera es relativamente reciente.

10.1 PERFORACIÓN DIRIGIDA APLICADA A LA EXPLORACIÓN MINERA

Actualmente las técnicas de perforación han avanzado de manera tal que se puede tener una gran precisión en cuanto a la longitud real perforada, así como al alguno de perforación deseado. Los equipos de perforación actuales están dotados de sensores e inclinómetros para conocer la trayectoria real del sondeo realizado.

Con estos avances tecnológicos, ampliamente usados en exploración petrolífera, surgen nuevas aplicaciones en exploración de depósitos minerales.

Con la perforación convencional surgen problemas de desviación durante la perforación. Aunque se controlen todos los parámetros a la perfección, pueden surgir desviaciones debidas a la falta de precisión en la perforación.

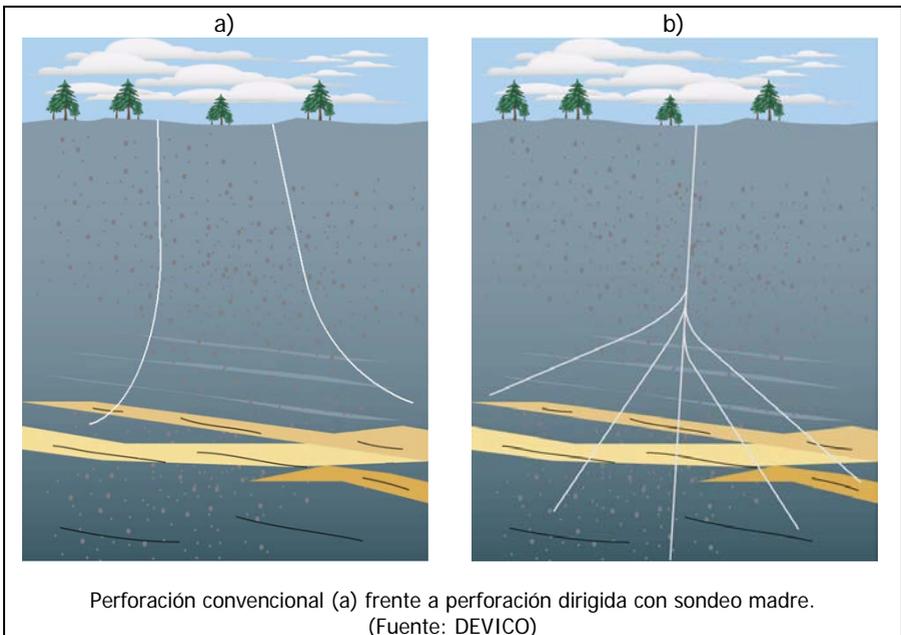
En el caso de estar perforando sondeos de gran longitud, se emplean grandes recursos de tiempo y dinero. Además, cuando hay que perforar en varios lugares a la vez, aspecto muy frecuente en campañas de exploración, pueden surgir problemas medioambientales por tener que acceder a sitios remotos con los equipos de perforación. Para cada emboquille de un sondeo, habrá que preparar caminos de acceso, preparar el área necesaria para la implantación de los medios auxiliares, así como para la construcción de una plataforma de trabajo adecuada. Como se ha visto anteriormente, incluso pueden necesitarse apoyo aéreo, mediante helicópteros, para el trabajo en las zonas más remotas.

Una posible solución para mitigar estos efectos es emplear **perforación dirigida** en la exploración de depósitos minerales. La perforación dirigida ofrece la

posibilidad de conocer de manera continua la posición de la sonda testiguera, y además ofrece la posibilidad de girar el sondeo en función de la trayectoria deseada para cada sondeo. Así, se puede corregir la desviación a medida que se progresan los trabajos de perforación. La precisión que se logra en equipos de perforación dirigida es de hasta 5 metros, precisión más que suficiente para la definición de un depósito mineral.

Además, con la posibilidad de conducir la trayectoria de los sondeos es posible la ejecución de varios sondeos desde una misma ubicación, minimizando el efecto medioambiental surgido de la construcción de accesos e infraestructuras.

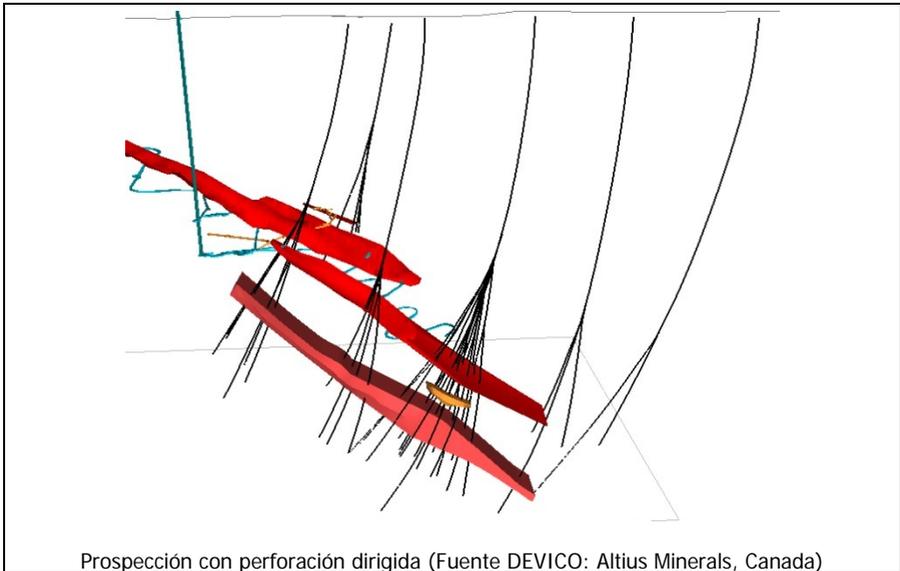
Otra posibilidad de la perforación dirigida es que se pueden perforar “barrenos madre” que sirvan como un único acceso desde la superficie hasta el techo del depósito mineral, y a partir de ese punto, emplear la perforación dirigida para perforar sondeos en varias direcciones. Por tanto, los “barrenos madre” serán reutilizados como acceso a la zona objetivo, en cada barreno de exploración.

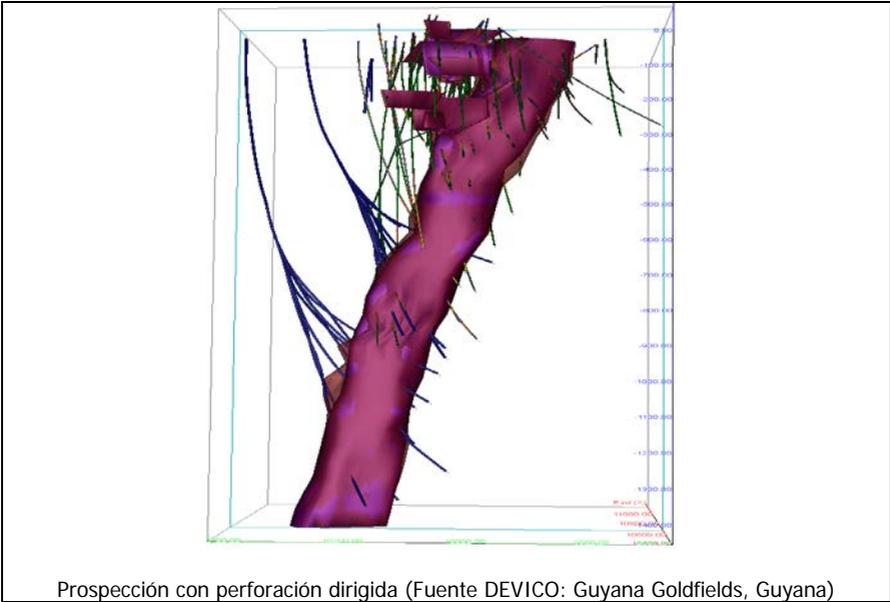


Con esta metodología de trabajo se optimiza el proceso en los aspectos siguientes:

- Se reduce la longitud de perforación
- Se reduce el tiempo de perforación
- Se reducen los costes
- Se mejora la calidad de la campaña de exploración.

Con las consideraciones anteriores se han estimado una disminución de un 70 % del tiempo de perforación y un ahorro de coste entre el 50 % y el 80 % por barreno perforado.





Prospección con perforación dirigida (Fuente DEVICO: Guyana Goldfields, Guyana)

10.2 INVESTIGACIÓN MARINA

La necesidad de dar respuesta al ritmo de consumo de materias primas hace necesaria la exploración de nuevos depósitos y yacimientos minerales. Por este motivo los fondos de lagos, mares y océanos son también objeto de estudio para la localización de yacimientos minerales.

En el caso de mares y océanos, se presentan unas de las condiciones más extremas de perforación que se pueden encontrar en la Tierra.

El fondo marino presenta combinaciones de alta presión, con temperaturas extremas junto con un ambiente corrosivo en un medio eléctricamente conductor.

En algunos casos, los equipos de perforación son sumergidos hasta la superficie marina, pero en otros los casos, la perforación se realiza desde la superficie. En este caso se necesita un barco o barcaza que, por medio de un equipo de izado, sostenga la sarta de perforación hasta alcanzar el lugar de perforación.

10.2.1 Barco de Perforación

El barco de perforación es un equipo flotante que ha sido adaptado a los trabajos de perforación submarina.

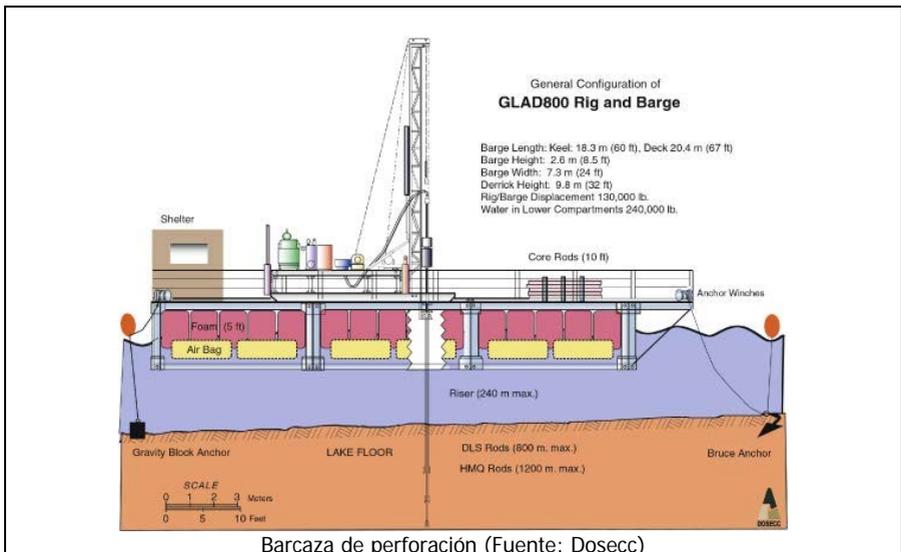
Ampliamente desarrollado para la exploración de hidrocarburos, están adaptados para portar todos los elementos necesarios para los trabajos de perforación.

La torre de perforación está ubicada en medio del barco, donde existe una abertura en el casco que permite el paso de la sarta.

El barco debe permanecer fijo durante las labores de perforación, tanto vertical como horizontalmente. Para ello se usan equipos de anclado en aguas tranquilas (lagos) y en el caso de mares y océanos, donde existe movimiento debido a las mareas se usan posicionamientos dinámicos que, apoyados por información GPS, identifican la posición del barco.



Fuente: Houston Geological Society



10.2.2 Planificación de la investigación marina

Los factores a tener en cuenta durante el proceso de planificación y que tendrán gran influencia tanto en la organización de los trabajos como en el desarrollo de los mismos son, entre otros, los siguientes:

- **Tiempo meteorológico.**
 - o El tiempo predominante en la zona de trabajo será clave para llevar a cabo los trabajos de forma segura.
 - o Asimismo es importante el viento, ya que grandes vientos implican el movimiento de la barcaza de trabajo, así como la dificultad del manejo de las herramientas para la realización de cada una de las maniobras. El movimiento del barco puede hacer incluso imposible el trabajo.
 - o La lluvia no solo resulta incómoda para las personas que están llevando a cabo los trabajos de perforación, sino que puede hacer que las superficies y las herramientas estén resbaladizas.
 - o De modo que se **garantice la seguridad**, los trabajos deberán paralizarse cuando las condiciones meteorológicas lo requieran.
 - o Por estos motivos, se deberán programar los trabajos en estaciones secas, donde las lluvias y viento se reduzcan al mínimo.
 - o Durante los momentos de grandes rachas de viento, las barcazas ancladas deberán liberarse para así evitar daños. Para ello habrá que retirar también la sarta de perforación de modo que no haya tensiones sobre la misma por el movimiento de la misma.

- **Conocimiento previo de la ubicación de los trabajos**
 - o La campaña de perforación suele venir precedida de campañas de prospección, donde por medio de prospección sísmica, por ejemplo, se tenga un conocimiento de la estructura litológica a perforar, de modo que puedan preverse la existencia de anomalías peligrosas, como por ejemplo, acumulaciones de gas.

- **Litologías anticipadas.**
 - o Una parte importante de la planificación es el conocimiento previo de la estructura a perforar, puesto que para cada tipo de roca los elementos, instrumentos y fungibles de perforación son diferentes, y en caso de estar lejos de la costa dificulta el trabajo.

Así, será más importante si cabe la correcta elección de bocas y cantidad de lodo.

- **Riesgos de la perforación**

- Como se ha comentado anteriormente, un buen conocimiento de la columna litológica, hace que sea posible predecir si hubiera acumulaciones de gas, pero del mismo modo, también es peligroso la presencia de estructuras antrópicas como por ejemplo cables enterrados, gasoductos u oleoductos.

- **Estructuras auxiliares en puerto/Barco de apoyo**

- Las instalaciones en el muelle serán necesarias para el apoyo a la unidad off-shore. Será necesario, incluso un barco de apoyo para facilitar realizar las tareas siguientes:
 - Remolcar a la barcaza hasta el lugar de perforación.
 - Apoyar al anclaje de la barcaza.
 - Transporte de personal, combustible, demás fungible y traslado de los testigos del sondeo a puerto.
 - Asistencia en el caso de emergencia.

- **Campaña de perforación**

- Un reto inicial es la ubicación de los sondeos. Como puede imaginarse, la dificultad es mayor que en tierra firme.
- En el plan de perforación, habrá que señalar:
 - Ubicación del sondeo
 - Lámina de agua
 - Muestra objetivo
 - Número de barrenos y profundidad objetivo
 - Litología anticipada
 - Programa de muestreo
 - Personal

10.2.3 Perforación mediante equipos sumergibles

Cuando las condiciones lo requieran es posible realizar las labores de perforación de sondeos por medio de equipos sumergibles operados por control remoto. De esta manera surgen los llamados medios robóticos.

Las técnicas robóticas de perforación proporcionan otro punto de vista en la toma

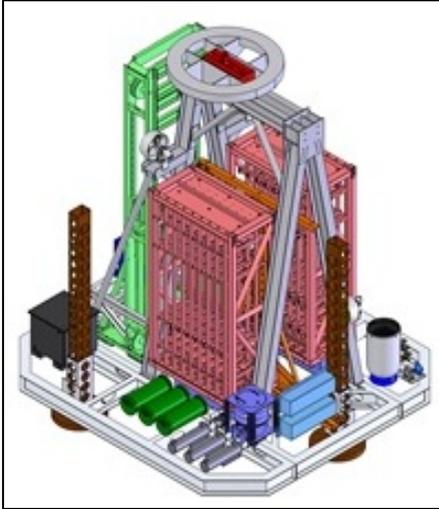
de muestras sin necesidad de disponer de una gran torre de perforación, o un barco de perforación donde todo el equipo de perforación se ubica en el fondo marino, separado del movimiento del buque. Esta tecnología fue originalmente desarrollada para extracción de testigo en aplicaciones científicas, pero pronto se vio su aplicación comercial en el campo de toma de muestras en geotecnia, extracción de testigos y elaboración de ensayos in situ, los cuales son habitualmente más eficientes que posicionar un barco de perforación en lugares remotos.

Los sistemas de perforación de submarinos son descendidos al fondo marino unido mediante un "cable umbilical". Los testigos recuperados y otras muestras son almacenados en la plataforma de perforación submarina. No existe ninguna sarta de perforación conectada a la superficie.

El "cable umbilical" es la parte crítica del sistema. Consiste en varios cables conductores de cobre, fibra óptica o conductores eléctricos para emitir y recibir señales de control, monitorización del sistema, y línea de video y datos. El cable debe tener suficiente resistencia mecánica para soportar el peso del propio equipo, incluyendo los testigos y muestras en el viaje de regreso al buque en superficie.

La perforación robótica tiene las siguientes ventajas:

- Permite llevar a cabo el trabajo sin necesidad de barcos caros y de disponibilidad limitada.
- Reduce los costes de movilización y de reubicación del buque de perforación
- El barco está mecánicamente desacoplado del equipo de perforación, lo que permite perforar en condiciones de gran oleaje.
- La operación en aguas profundas no necesita una sarta de perforación para salvar toda la columna de agua.
- Los sistemas robóticos pueden empezar a perforar más fácilmente en roca expuesta, mientras que los buques de perforación desde la superficie, necesitan una pequeña capa de sedimento para estabilizar inicialmente la boca de perforación.



Equipo robótico de perforación bajo el mar (Fuente: Wassoc)

10.3 PERFORACIÓN EN AMBIENTES EXTREMOS

La necesidad de realizar campañas de exploración en zonas cada vez más remotas, hace que se organicen campañas en zonas de condiciones extremas, tanto como para los equipos de perforación, como para el personal encargado de organizar los trabajos. Además surgen nuevos métodos de trabajo, adaptados a tal variedad de condiciones.

La perforación en ambientes extremos puede ser:

- Perforación marina.
- Perforación en zonas desérticas.
- Perforación en zonas polares.
 - o Perforación en hielo.
 - o Perforación en permafrost.
- Perforación en altitud.

La perforación marina se ha desarrollado previamente en esta publicación y los otros casos se detallan a continuación.

10.4 Trabajo en clima desértico

El clima desértico es una condición intrínseca a los trabajos de exploración es que se llevan a cabo en zonas cada vez más inhóspitas. Esto es debido a que los yacimientos más accesibles ya han sido, o están siendo explotados en la actualidad, por lo que hay que buscar en ubicaciones cada vez más remotas.

En el caso de perforaciones en zonas desérticas, el primer inconveniente que surge sería la localización de agua, en el caso de ser necesaria para la lubricación de la perforación.

Por otro lado, las máquinas y útiles de perforación sufren la alta temperatura predominante en estas zonas, así como los cambios en la misma entre el día y la noche.



10.5 Trabajo en clima polar

La perforación en hielo con extracción de testigo puede ser un gran desafío no sólo por las condiciones ambientales extremas, debidas a las bajas temperaturas, sino por las particularidades de la perforación.

La perforación en zonas polares puede estar motivada por dos objetivos diferentes:

- Exploración de la roca bajo el hielo
- Estudio del propio hielo

En ambos casos, cuando la presencia de hielo es permanente, éste será el material que perforar.

Además de la dureza del medio a perforar (hielo), hay un tema importante que es que durante la perforación, parte del hielo se funde, pero puede convertirse nuevamente en hielo, incluso hasta llegar a bloquear completamente la sarta de perforación.



10.6 Trabajo a gran altitud

Otra de las condiciones más extremas que se puede encontrar en las labores de exploración es la necesidad de realizar las campañas en lugares de gran altitud.

A medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, disminuyen tanto la presión de la atmósfera como su densidad.

Este es el caso de lugares de Sudamérica, en países andinos como Chile, Perú, Bolivia; en países asiáticos de gran exploración minera como Kazajistán, Uzbekistán, Kirguistán, así como Mongolia, donde se pueden llegar a realizar los trabajos a más de 5.000 m de altitud.

En estos lugares se pueden presentar dos problemas principales que hay que tener en cuenta: efectos sobre el Personal y efectos sobre la maquinaria

En cuanto a efectos sobre el personal ocurren a partir de los 3.000 m, a partir de entonces es posible que el personal que realiza los trabajos sufra del denominado "mal de altura". Este efecto surge debido a que la presión atmosférica es menor a partir de esos lugares por lo que el cuerpo humano no es capaz de absorber el suficiente oxígeno para mantener la actividad. Los efectos dependen de la sensibilidad de cada individuo, provocando comúnmente dolores de cabeza, vómitos, malestar...



Kuntor mine, Kyrgyzstan. Minería a más de 4.000m de altitud (Fuente: SRK)

En cuanto a los efectos sobre la Maquinaria el problema surge porque es estas altitudes, el rendimiento de los motores de combustión baja, por lo que la

producción de sondeos, en este caso, también baja.

Este hecho hay que tenerlo en cuenta durante la fase de planificación de las campañas de exploración. En máquinas diesel, por cada 100 m de altura sobre el nivel del mar los motores de cuatro tiempos disminuyen un 1% en potencia.

En un motor de pistón y combustión interna, el rendimiento (potencia y par) se reduce de acuerdo al promedio que arrojan la presión y la densidad (de las moléculas de oxígeno).

A continuación se consignan los valores correspondientes para motores atmosféricos:

Altura s.n.m.	Disminución de la presión atm.	Reducción densidad del aire	pérdida del rendimiento motor
1.000 m	11,4 %	9 %	10,2 %
2.000 m	21,6%	18 %	19,8 %
3.000 m	30,9 %	26 %	28,5 %
4.000 m	39,0 %	33 %	36 %
5.000 m	46,7 %	40 %	43,35 %
6.000 m	53,5 %	46 %	49,75 %

10.7 TENDENCIAS EN ANÁLISIS DE TESTIGOS

A continuación se muestran herramientas disponibles para la exploración minera, permitiendo un trabajo más rápido con una menor manipulación de los testigos, así como herramientas de campo para mejorar las condiciones de las campañas de exploración.

Si bien, las nuevas tecnologías no sustituyen el trabajo humano por parte de ingenieros de minas y geólogos, representan avances en la adquisición de datos desde testigos de roca, así como un reconocimiento previo más preciso.

10.7.1 Técnicas de reconocimiento de testigo.

Actualmente existen sistemas que facilitan el trabajo de gabinete para el reconocimiento de minerales y de interpretación de la columna litológica del terreno.

Principalmente están basados en minimizar la manipulación de los testigos de sondeo, evitando en la medida de lo posible el acarreo continuo de cajas de sondeo, manteniendo además un mayor estado de inalterabilidad.

Muchas compañías requieren un registro permanente de la apariencia de los sondeos, de modo que, a veces, se pueden fotografiar el testigo completo de la campaña de sondeos. Las fotografías mostradas en las cajas portatestigos suelen recoger pocos detalles, pero son útiles para un reconocimiento general de la apariencia de la roca, incluyendo aspectos como el color, estructuras prominentes, o grado de fracturación. Si, por cualquier motivo se pierden o se destruyen los testigos, las fotografías a color de los testigos pueden ayudar a completar la interpretación geológica. En el caso de que se quiera volver a estudiar una campaña de exploración anterior, es más fácil, trabajar sobre el reconocimiento de fotografías que sobre las cajas portatestigos antiguas.

El fundamento de estos sistemas está en la adquisición de imágenes de los sondeos y su manipulación digital posterior.

Las fotografías de testigos son fáciles de tomar, la calidad actual de las mismas es más que aceptable, y se pueden tomar con una cámara portátil. Sin embargo es más útil tener una cámara montada verticalmente sobre un bastidor.

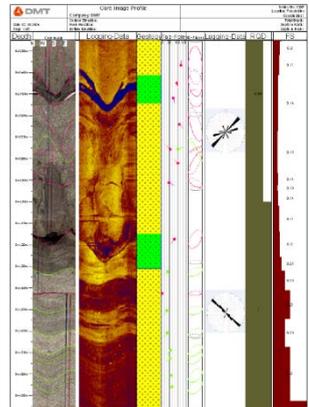
Como evolución de este sistema actualmente se han desarrollado sistemas que automatizan en gran medida este proceso usando escáneres digitales.

Además se puede obtener un reconocimiento de todo el desarrollo del testigo, es decir, de 360 grados, en lugar de tener una única imagen por cada longitud de testigo.

El sistema esta compuesto por un escáner sobre un bastidor que permite la ubicación del sondeo, realizando el escaneado, bien sobre testigos cortados, bien sobre testigos originales, realizando una digitalización en tres dimensiones del mismo.

Las ventajas del escáner de testigos son:

- Aplicable a todo tipo de testigo
- Portátil y autónomo
- Se puede tener acceso online a la información, catalogando los testigos e una biblioteca virtual de imágenes/testigos
- Permite realizar un análisis estructural de los testigos, pudiendo hacer un análisis del contenido mineral y determinar el tamaño de grano y otras propiedades geomecánicas de los testigos.



Escáner de reconocimiento de testigo e informe de resultados (Fuente DMT)

10.7.2 Técnicas de análisis de muestras por XRF. Fluorescencia.

La fluorescencia es la propiedad de una sustancia para emitir luz cuando es expuesta a luz o radiaciones electromagnéticas. Las radiaciones absorbidas son transformadas en luz de una longitud de onda mayor al incidente.

En el proceso, una molécula absorbe un fotón de alta energía, el cual es emitido como un fotón de baja energía (mayor longitud de onda). La diferencia de energía entre la absorción y la emisión, es disipada como calor (vibraciones moleculares)

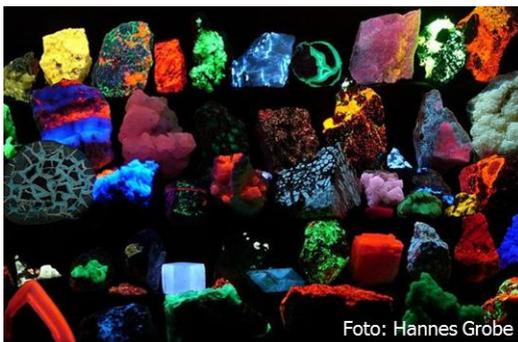


Foto: Hannes Grobe

Sin embargo, en una muestra de minerales que poseen propiedades fluorescentes, no todos ellos, incluso los que se han extraído de un mismo lugar, presentan la característica luminiscencia. Por otro lado existe una amplia variedad de colores, dependiendo de la longitud de onda emitida.

Las técnicas de análisis de muestras por XRF se basan en la aplicación de la fluorescencia por rayos X para el reconocimiento en campo del contenido mineral.

Este sistema es aplicable tanto en afloramientos como en testigos, ya que tiene carácter portátil, para un fácil reconocimiento en campo, para posibilitar una medición del contenido mineral elemental.

Una desventaja que presentan estos equipos hoy en día es su alto precio



Técnicas de análisis de muestras por XRF (Fuente: Thermo Scientific)

11. BIBLIOGRAFÍA

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.

Bar-Cohen (2009) "Drilling in Extreme Environments", Willey-VCH GmbH.

U.S Bureau of Reclamation (2001). "Engineering Geology Field Manual". U.S. Department of the Interior.

López Jimeno, C. (2001) "Manual de Sondeos. Aplicaciones". E.T.S.I Minas. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Escalante, M. (2004). "Métodos Geoquímicos de Exploración Minera". Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Méjico.

Sabins (1999), "Remote sensing for mineral exploration", Ore Geology Reviews N.14

Gunter, F. (1991). "Principles and Applications of Inorganic Geochemistry". Macmillan Publishing Co.

Pernía, J, et al. (1991) "Aplicación de Técnicas Especiales al Estudio hidrológico de zonas de baja permabilidad: Diseño de Sondeos". ITGE. España.

Hartman (1987), "Introductory Mining Engineering", Wiley-Interscience Publication.

Levison, A. A. (1980). "Introduction to Exploration Geochemistry". 2ª edición. Applied Publishing.

Rose A. W. et al.(1979). "Geochemistry in Mineral Exploration".

"Técnicas y Sistemas de Perforación". www.lasperforaciones.com

Atlas Copco Multimedia Gallery: www.atlascopco.com

Sandvik Photo Archive: www.sandvik.com



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS
DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y
OBRAS SUBTERRÁNEAS



POLITÉCNICA