

1. Introducción

Definición: Exploración y Prospección

Según el 'Dictionary of Geological Terms', (BATES & JACKSON, 1984) exploración designa la búsqueda de depósitos de minerales útiles o de combustibles fósiles. En este diccionario no se distingue entre exploración y prospección. El término 'minerales útiles' se refiere a minerales económicamente valiosos. Algunos autores como HARTMAN (1987) diferencian exploración y prospección en lo que concierne su objetivo y a partir de éste el principio de trabajo aplicado:

EL OBJETIVO DE LA PROSPECCIÓN es el reconocimiento general de un yacimiento mineral,

LA EXPLORACIÓN está enfocada en un reconocimiento detallado del depósito mineral.

Modelos de depósitos minerales y de depósitos de combustibles fósiles igualmente se basan en las asociaciones minerales esperadas en distinta profundidad. Los guías a los depósitos minerales, los remanentes alteradas descubiertas en la superficie terrestre pertenecen a un sistema de entropía (grado de desorden o grado de mezcla) mayor en comparación al modelo. El modelo ubicado en cierta profundidad no aparece en la superficie terrestre hasta que recibe un impacto del ambiente superficial reciente.

Abundancia normal de los elementos en la corteza terrestre

A menudo se comparan la búsqueda de un depósito mineral con la búsqueda de una aguja adentro de un "pajar". En el este de Canadá por ejemplo la probabilidad de descubrir un yacimiento mineral favorable para desarrollarlo es 1:1000 según una revista minera canadiense del año 1980 (The Mine Development Process, Annual Report, Placer Development Ltd., Vancouver, BC Canada, 1980).

En base de la abundancia normal de los elementos en la corteza terrestre se define el factor de enriquecimiento (concentration **CLARKE** en inglés) como el factor, conque se debe multiplicar la abundancia normal de un elemento (**THE CLARKE**) en la corteza terrestre para obtener una concentración económicamente explotable. El **Cutoff Grade** para un elemento (el límite inferior de la gestión económica) designa la concentración mínima de la mineralización, que todavía se puede explotar económicamente. Con el **cutoff grade** variándose por la situación económica mundial o por otros factores variaría el factor de enriquecimiento asimismo. La abundancia normal de varios elementos químicos en la corteza terrestre, se hallan en la tabla: 'Abundancia normal de los elementos químicos en rocas de la corteza terrestre', los cutoff grades y factores de enriquecimiento para algunos elementos químicos se

encuentran en la tabla: 'Factores de enriquecimiento de algunos elementos' en el capítulo 'Método geoquímico'.

Concepto de la herencia

De vez en cuando durante la historia geológica los componentes de rocas y depósitos minerales entran en ambientes nuevos, donde algunos de sus aspectos se mantienen y donde algunas de sus propiedades mineralógicas cambian debido a las nuevas condiciones geoquímicas. En este sentido las rocas y los depósitos minerales llevan una herencia. La presencia de una herencia y de una roca de partida es obvia en los depósitos de placeres, en depósitos supergénicos de sulfuros y en depósitos de uranio del tipo 'roll-front'. El término 'roll-front' se refiere a depósitos de forma curvada, no concordantes con respecto a las capas, que los albergan. En el caso de los depósitos de uranio de este tipo las rocas encajantes generalmente son areniscas. El uranio se disuelve debido a procesos de corrosión, es transportado y migra hacia abajo en los estratos de areniscas, donde el uranio se redeposita.

Debido a los varios procesos geológicos, que pueden afectar una asociación de minerales generalmente la presencia de una herencia no es tan obvia como en este ejemplo arriba presentado. El depósito de plomo de Midbladen en Marocco da un ejemplo para una herencia menos evidente. Se constituye de zonas de galena diseminada, de galena diseminada y baritina densa ubicada en cuerpos estratiformes de margas y pelitas del jurásico, de galenitas en vetas y de un conglomerado cretácico con 'pebbles' de barita. Las fases sucesivas de mineralización fueron confirmadas claramente por medio de estudios de los isótopos de plomo. En base de los estudios estratigráficos y estructurales los científicos pensaron, que la mineralización la más antigua proviene del Lias, pero estudios isotópicos indican, que probablemente se deriva de una mineralización aun más antigua.

Clasificación de los minerales económicos

La clasificación siguiente de los minerales económicos se basa en su componente esencial y en su aplicación:

1. Menas metálicas
2. Depósitos no metálicos
3. Material energético

1. Menas metálicas incluyen

- menas de metales ferrosos como hierro, manganeso, molibdeno, wolframio
- metales básicos como cobre, plomo, cinc, estaño
- metales preciosos como oro, plata, platino
- metales radioactivos como uranio, torio, radio.

2. Depósitos no metálicos son:

- Fosfato

- Carbonato potásico (K_2CO_3 , potasa)
- Carbonato cálcico $CaCO_3$ (CaO_2 para la producción de cemento)
- Sal p. Ej. La sal común cloruro de sodio NaCl, cloruro potásico KCl etc.
- Arcillas, útiles en aplicaciones industriales por ejemplo en la industria cerámica se utiliza un suministro de arcillas puras para la producción de porcelanas y arcillas de menor calidad para fabricar material refractario, tuberías etc.. En general las arcillas formadas por la meteorización de granito o de pegmatita tiene alta utilidad, las arcillas constituyentes de las arcillolitas marinas corrientes no sirven para la producción de cerámica.
- Rocas de las canteras, areniscas, gravas
- Salitre
- Guano
- Zeolitas
- Liparita (piedra pómez)
- Diatomita
- Azufre (producción de ácido sulfúrico para celulosa, la vulcanización de caucho, en la pirotécnica)
- Asbesto
- Talco, un silicato magnésico hidratado (aplicación en industria y medicina)
- Diamantes (en la industria para coronas de perforación, para abrasivos, mineral precioso)
- Piedras preciosas como diamante, rubí, zafiro etc.
- Agua subterránea
- Agua termal

3. Material energético incluye

- carbón, petróleo, gas natural, lignito, arcilla bituminosa, arena asfáltica, lignito pardo, turba, metano en capas de carbón.

La prospección y la exploración como fases en la vida de una mina

Se puede comparar las etapas de trabajo en una mina con las fases en la vida de una mina. Se distingue cuatro fases:

1. Prospección
2. Exploración
3. Desarrollo
4. Explotación

La exploración y la prospección son fases estrechamente ligadas y a veces se las combinan, a menudo los geólogos se ocupan de ellas. El desarrollo y la explotación son las fases, que en general los ingenieros de minas realizan. Las fases están descritas en la tabla siguiente.

Tabla: Fases en la vida de una mina según HARTMAN (1987)

Fase	Procedimiento	Intervalo de tiempo en años	Costos por tonelada
1. Prospección	<p>Búsqueda de menas</p> <p><i>Métodos de prospección:</i> Directo - física, geología. Indirecto - geofísica, geoquímica.</p> <p><i>Localización de lugares favorables:</i> Mapas, publicaciones, minas antiguas y presentes.</p> <p><i>Aire:</i> Fotos aéreas, imágenes de satélite, métodos geofísicos.</p> <p><i>Superficie:</i> Métodos geofísicos y geológicos.</p> <p>Anomalía - Análisis - Evaluación.</p>	1-3	2-50¢US
2. Exploración	<p>Dimensión y valor del depósito mineral</p> <p><i>Muestreo:</i> Excavación, roza, sondeo.</p> <p>Assay test - cálculo de grado.</p> <p><i>Evaluación:</i> Hoskold formula, discount method, estudio de factibilidad.</p> <p>Valor actual = rendimiento - costos.</p>	2-5	1¢-1¢US
3. Desarrollo	<p>Depósito mineral abierto para la producción</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Derechos de minería 2. Estudio del impacto de minería al medio ambiente 3. Infraestructura 4. Planta 5. Explotación 	2-5	25¢-5\$US
4. Explotación	<p>Producción de las menas</p> <p><i>Factores, que influyen la selección del método aplicado son</i> geología, geografía, economía, medio ambiente, aspecto social, seguridad.</p> <p><i>Métodos mineros son entre otros</i> explotación a cielo abierto, open pit, open cast; explotación a grandes cortes, a cortes con hundimiento.</p> <p>Monitor costs y reserva económica para 3 a 10 años.</p>	10-30	2-100\$US

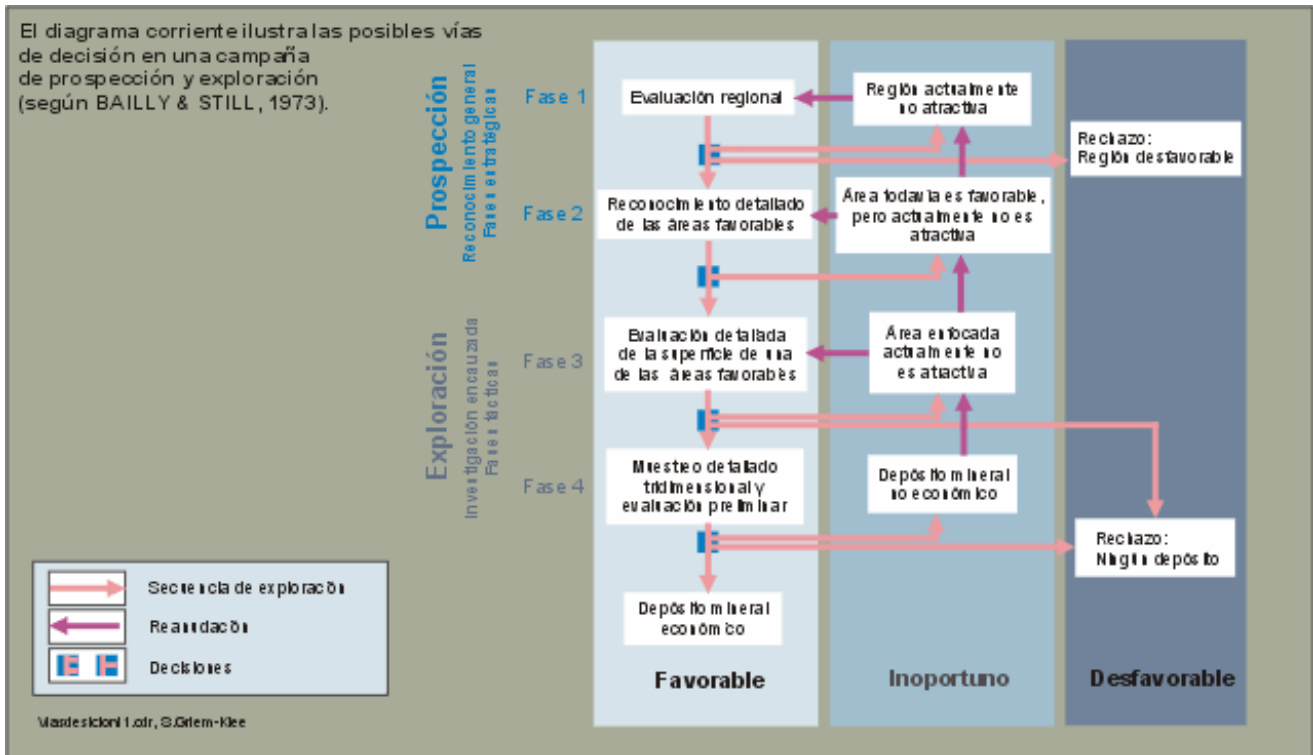
En la primera fase, en la prospección se quiere lograr un reconocimiento general del área de interés, localizar una anomalía con las propiedades de un depósito mineral y reducir su tamaño. La prospección está enfocada en la búsqueda de las menas ubicadas relativamente cerca con respecto a la superficie aplicando los métodos directos e indirectos de prospección. Para la localización de un depósito mineral se aplica las fotos aéreas y las imágenes de satélite del área en cuestión, la topografía y los mapas estructurales correspondientes. Directamente se levanta y analiza los afloramientos de un depósito mineral y/o las rocas meteorizadas y/o alteradas, que pueden originar de un yacimiento mineral. En casos más complejos se lleva a cabo un levantamiento de la geología del área de interés como de las formaciones geológicas, de sus dimensiones y de su estructura. Se toma distintos tipos de muestras (método indirecto) como del agua de río, del suelo, de plantas o de rocas y se aplica en ellas los análisis del laboratorio adecuados como los análisis químicos en muestras de agua, los análisis petrográficos (por un microcopio polarizador) y geoquímico (por ejemplo el análisis de fluorescencia de rayos X o el análisis por la espectrometría de absorción atómica) en muestras de rocas por ejemplo para obtener informaciones acerca de la calidad, la cantidad y la distribución de los elementos y/o los minerales de interés y acerca de la génesis de la mineralización. Estos métodos también pueden dar resultados en el caso de depósitos minerales descubiertos por ejemplo por una capa de aluviones.

Los métodos indirectos abarcan los métodos geofísicos y los métodos ya mencionados como el '**remote sensing**', el muestreo y los métodos geoquímicos. Los métodos geofísicos sirven para detectar anomalías geofísicas, que pueden ser originadas por depósitos minerales. Los métodos geofísicos en parte son adecuados para el uso aéreo, superficial y subterráneo, como el método magnético, y se puede aplicarlos a partir de la superficie terrestre, a partir del mar o en una mina como el método sísmico.

La segunda fase, la exploración está enfocada en un reconocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la fase de prospección. Ahora se delinean las dimensiones exactas y el enriquecimiento del depósito mineral principalmente por medio de los mismos métodos aplicados en la prospección, pero en un área reducida y claramente definida. Se realizan sondeos y mediciones geológicas y geofísicas en los pozos generados (borehole-logs). Se toman muestras representativas (esquirlas de la superficie, a lo largo de excavaciones, túneles o de perforaciones, rocas compactas) a través de una red de muestreo con espaciamiento mucho más angosta como aquel establecido en la prospección y se las analizan. Los métodos de exploración se aplican en la superficie y en el subterráneo. La fase de exploración se termina con un estudio de factibilidad ('feasibility study'- **estudio de factibilidad**) en base del conjunto de datos obtenidos en las dos fases. A partir del estudio de factibilidad se puede decidir si se continuará con el desarrollo y la explotación del depósito mineral o si se abandonará este proyecto.

En efecto no existe un límite claramente definido entre la prospección y la exploración, y muchos autores utilizan los dos términos como sinónimos. Las fases del desarrollo y de la explotación son caracterizadas detalladamente en otras asignaturas.

El siguiente diagrama corriente ilustra las vías de decisión posibles durante una campaña de prospección y exploración.



En este diagrama se aprecia, que la prospección apunta a un reconocimiento general de una región y que en la exploración se enfoca una investigación encauzada de un área claramente definida y más reducida con respecto al área cubierta en la prospección. En la prospección se desarrolla una estrategia (fases estratégicas), la exploración está caracterizada por las fases tácticas. Cada fase resulta en una evaluación del proyecto y con la decisión de continuar o terminarlo (de la evaluación regional a la evaluación del depósito mineral). Los varios tipos de decisiones se puede clasificar como sigue en decisiones:

- favorables (continuación del proyecto),
- inoportunas (proyecto congelado en este momento, pero posiblemente se vuelve favorable luego) y
- desfavorables (fin del proyecto).

En un proyecto complejo se toman las decisiones por computadores y por métodos especiales como 'the critical path method' (CPM).

Objetivos de prospección y exploración

El primero objetivo de la prospección es la localización de una anomalía geológica con propiedades de un depósito mineral, un objetivo común de la prospección y de la exploración es la reducción del área de investigación. Comúnmente las áreas en consideración se disminuyen de 2500 - 250.000km² en la primera fase a 2,5 - 125km² en la segunda fase y la tercera fase a 0,25 - 50km² en la última fase (BAILLY, 1966). Un otro objetivo común consta en aumentar las ventajas del área prometedora con respecto a su explotación rentable, como por ejemplo ocuparse de un camino de acceso transitable y de un peritaje del medio ambiente. La exploración se finaliza con el estudio de factibilidad.

En lo siguiente se caracterizará los métodos de prospección/exploración como el método geológico, los métodos geofísicos y geoquímicos y el 'remote sensing'.


Método geológico

El método geológico es un método directo de prospección o exploración respectivamente (levantamiento geológico y estructural en el terreno) y la base para todos los demás métodos. Se constituye del levantamiento geológico y estructural de la superficie, de los afloramientos y como posible del subsuelo (sondeos, minas) en el área de interés. El levantamiento geológico en el terreno está apoyado por los análisis petrográficos, mineralógicos y geoquímicos en el laboratorio y por estudios estadísticos de los datos estructurales obtenidos en terreno. Por medio del método geológico se logra un reconocimiento de un depósito mineral en lo que concierne su estructura, su petrografía y mineralogía y los procesos de formación del mismo.

En la prospección geológica una clasificación de los depósitos minerales es indispensable. La clasificación siguiente (Fig. LEWIS & CLARK, 1964) se basa en aspectos genéticos y económicos. En esta clasificación se supone un origen magmático de los minerales. Se distingue los depósitos minerales primarios, generados directamente por el magma, los depósitos minerales secundarios formados por procesos de alteración, meteorización química y mecánica y los depósitos minerales metamórficos, que se deben a un proceso de metamorfismo.

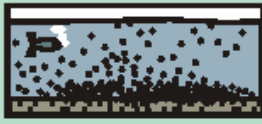
Clasificación de depósitos minerales modificada según LEWIS & CLARK, 1964 parte 1

Depósitos minerales primarios

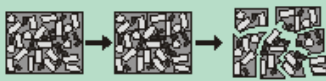


Formados por procesos magmáticos. El magma, que origina en el manto superior y en altas profundidades de la corteza terrestre es la fuente de la materia terrestre. De unos pocos tipos de magmas se derivan una gran variedad de rocas magmáticas. El enfriamiento y la diferenciación por cristalización dan lugar a la formación de magma ácido y de magma básico. El magma ácido proporciona los componentes para numerosos minerales accesorios.


Depósitos minerales secundarios



Formados por procesos sedimentarios, que ocurren en o muy cerca de la superficie terrestre, tales como la meteorización mecánica, la meteorización química y la diagénesis.



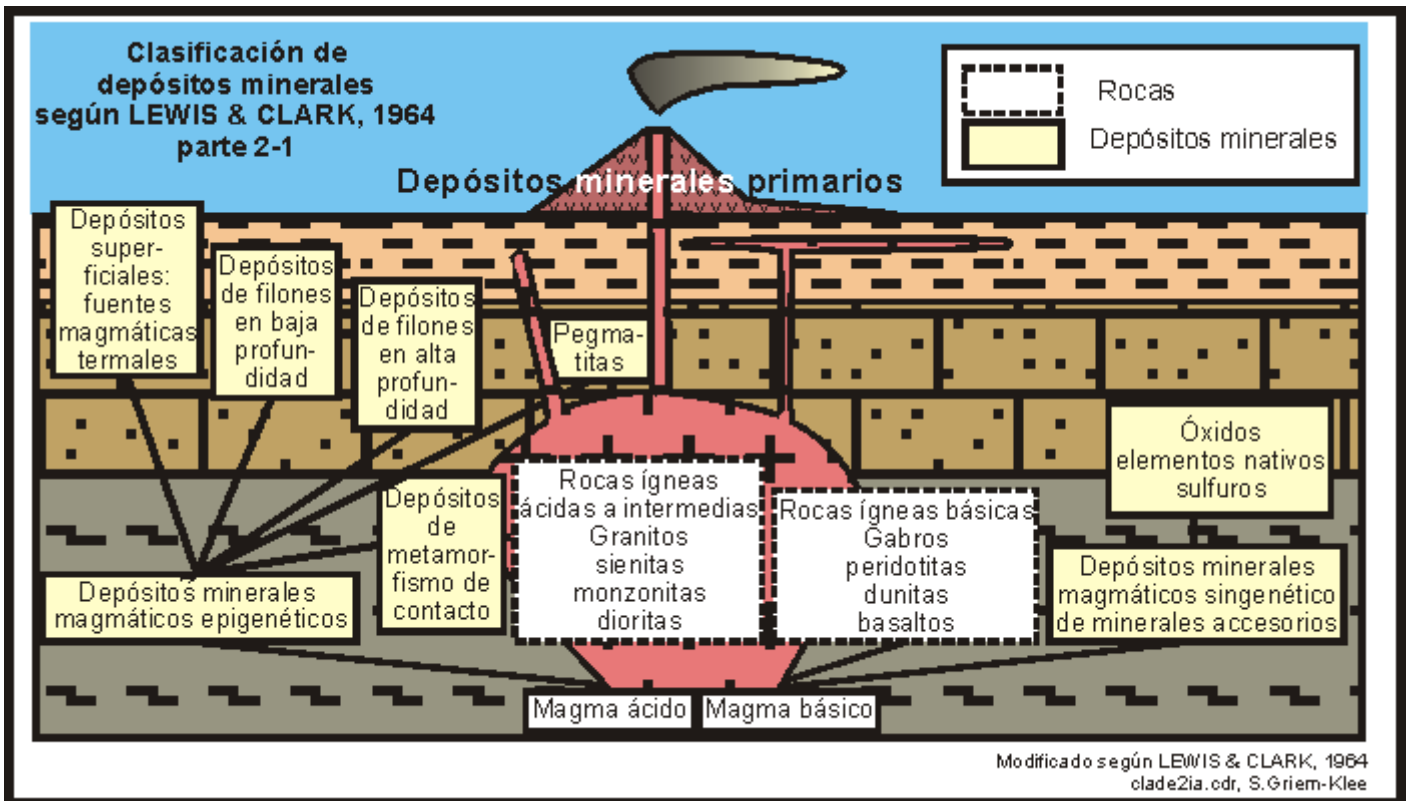
Depósitos minerales formados por metamorfismo

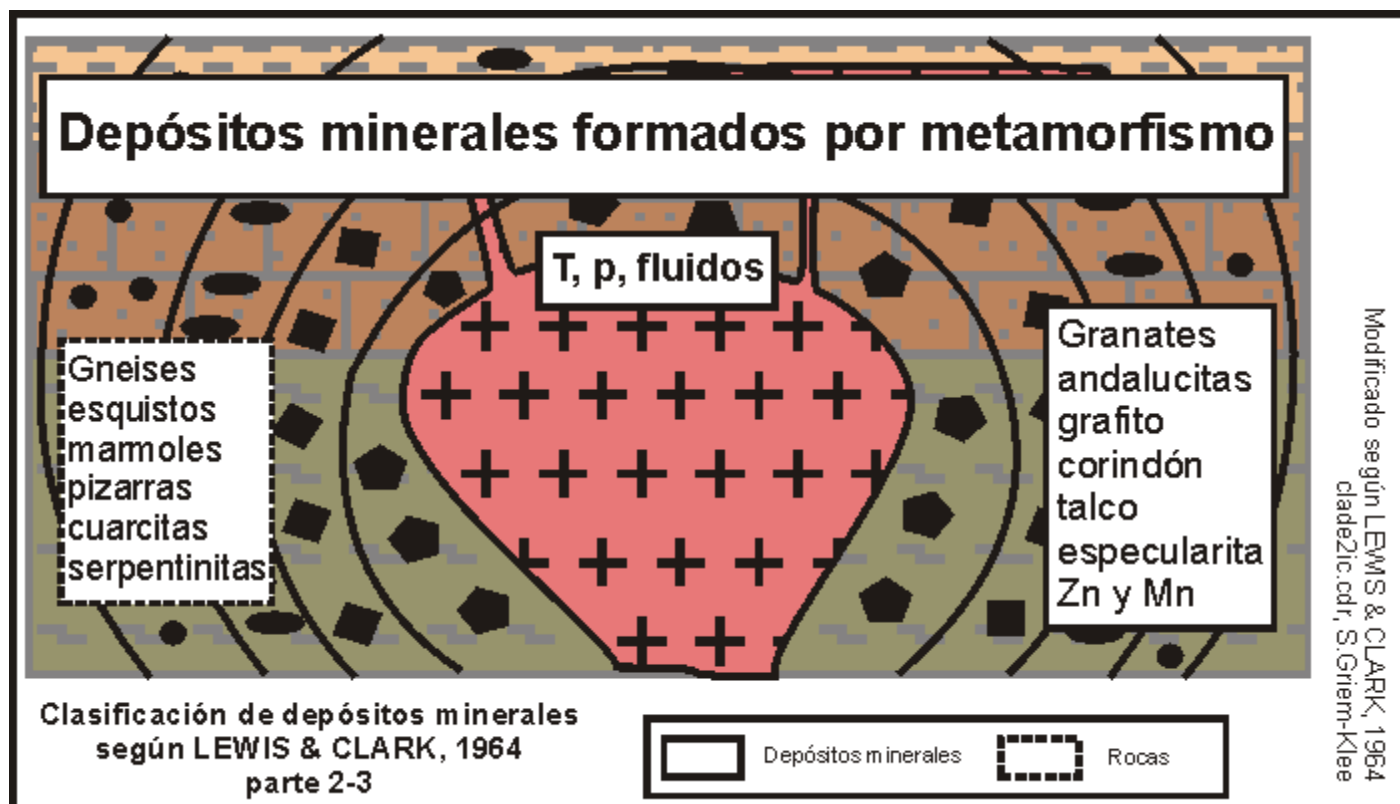
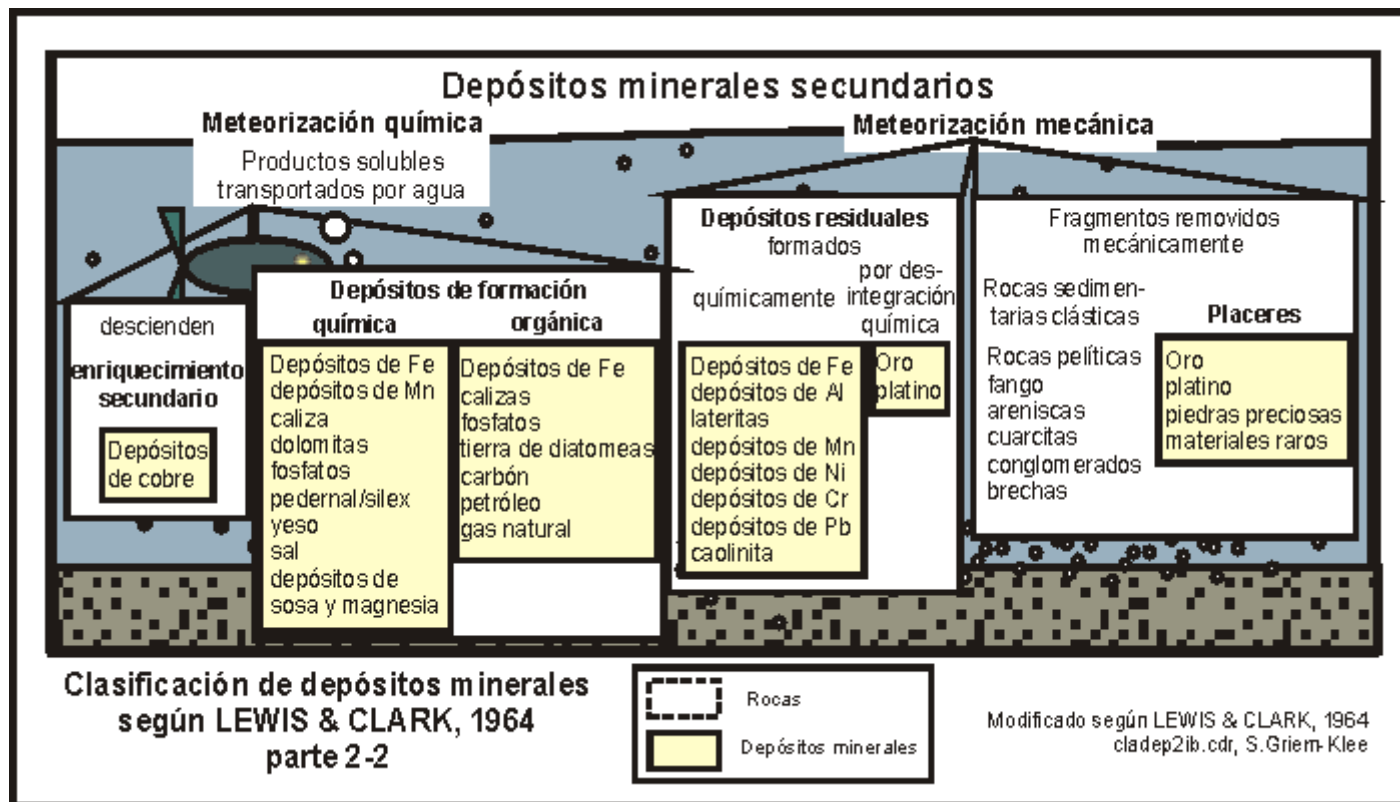


Los procesos metamórficos se caracterizan por alta temperatura, alta presión y/o la presencia de fluidos. En su mayoría los procesos metamórficos ocurren en relativamente altas profundidades en la corteza terrestre.

Cladep 11.odr, S.Griem-Klee

Clasificación de depósitos minerales según LEWIS & CLARK, 1964 parte 2-1





Los depósitos minerales sin genéticos se forman simultáneamente con las rocas encajantes, los depósitos minerales epigenéticos se forman después de la formación de las rocas de caja.

CALLAHAN (1982) nombra algunos ambientes muy prometedores para el descubrimiento de un depósito mineral como discordancias erosivas, intrusiones, zonas de enriquecimiento y de alteración, zonas de cabalgamiento, donde placas tectónicas chocan, además depósitos estratiformes en vulcanitas y rocas sedimentarias y la superficie límite entre el fondo de mar y el océano (lomos oceánicos).

Método geoquímico

El método geoquímico es un método indirecto de prospección y se ocupa de la determinación de la distribución y de la abundancia de ciertos elementos como los elementos indicadores y los elementos exploradores relacionados con un depósito mineral. Una anomalía geoquímica se refiere a una variación en la abundancia de un elemento en comparación a su abundancia normal en un área definida. Una anomalía geoquímica puede ser relacionada o no con un depósito mineral.

Para un reconocimiento geoquímico general se toman las muestras a través de una red de muestreo irregular o de espaciamiento grande y analizan muestras de sedimentos de ríos, de suelos y de rocas, en casos especiales se trabajan con muestras de vapor, vegetación y agua. Según los objetivos (¿De qué muestras se trata? ¿Cuáles son los minerales/elementos de interés?) se elige el método analítico adecuado como por ejemplo la espectrometría de absorción atómica para analizar muestras de agua con respecto a su contenido en Cu, Mo, Zn, Au, Ag, As, F, el análisis de fluorescencia de rayos X para obtener el contenido en óxidos de elementos de la roca entera. Los resultados se presentan en un mapa o un perfil geoquímico por medio de isolíneas o es decir de líneas, que unen los puntos o lugares de la misma concentración de un elemento.

En la prospección geobotánica, que usualmente se considera como una parte de la prospección geoquímica se estudian la distribución y la asociación de plantas y variaciones en el crecimiento vegetal.

También la geozoología, que se ocupa de la observación y del análisis del muestreo de mamíferos, aves, peces e insectos puede contribuir al reconocimiento de un área mineralizada.

Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos son métodos indirectos de prospección o exploración respectivamente. Por medio de los métodos geofísicos se puede identificar una anomalía geofísica. El término anomalía geofísica se refiere a una propiedad física de la tierra, que en un volumen definido difiere apreciadamente con respecto a su valor común o normal correspondiente a esta área. En un caso favorable una anomalía geofísica corresponde a un depósito mineral. Una anomalía de gravedad puede ser causada por ejemplo por un depósito mineral de cromita o por un cambio lateral en la litología de una arenisca a una dunita (Fig. en preparación). Si la anomalía geofísica detectada por un método geofísico está relacionada con un depósito mineral o con un otro fenómeno geológico o físico, se comprueba aplicando otros métodos de prospección como otros métodos geofísicos, el método geológico y el método geoquímico.

Un requisito para el uso eficaz de los métodos geofísicos es la presencia de diferencias mensurables entre las propiedades físicas del depósito mineral y las rocas encajantes.

La selección del método y de los métodos más convenientes para un área de interés, donde se presumen la presencia de un depósito mineral, se funda en todos los datos ya disponibles como los datos geológicos y físicos, en el consumo de tiempo y en los costos y depende del avance del proyecto. En la primera fase del proyecto se prefiere los métodos geofísicos, que contribuyen al reconocimiento general de un área de interés, como los métodos aéroportados, en una fase más avanzada se aplica los métodos a partir de la superficie y del subsuelo y aquellos, conque se puede delinear el depósito mineral ya descubierto como por ejemplo el método gravimétrico.

Los resultados de las mediciones geofísicas o es decir las variaciones encontradas de una cierta propiedad geofísica se ilustra por medio de mapas y perfiles. Estableciendo una red de estaciones de observación o trazando varios perfiles paralelos se puede lograr un modelo tridimensional del subsuelo.

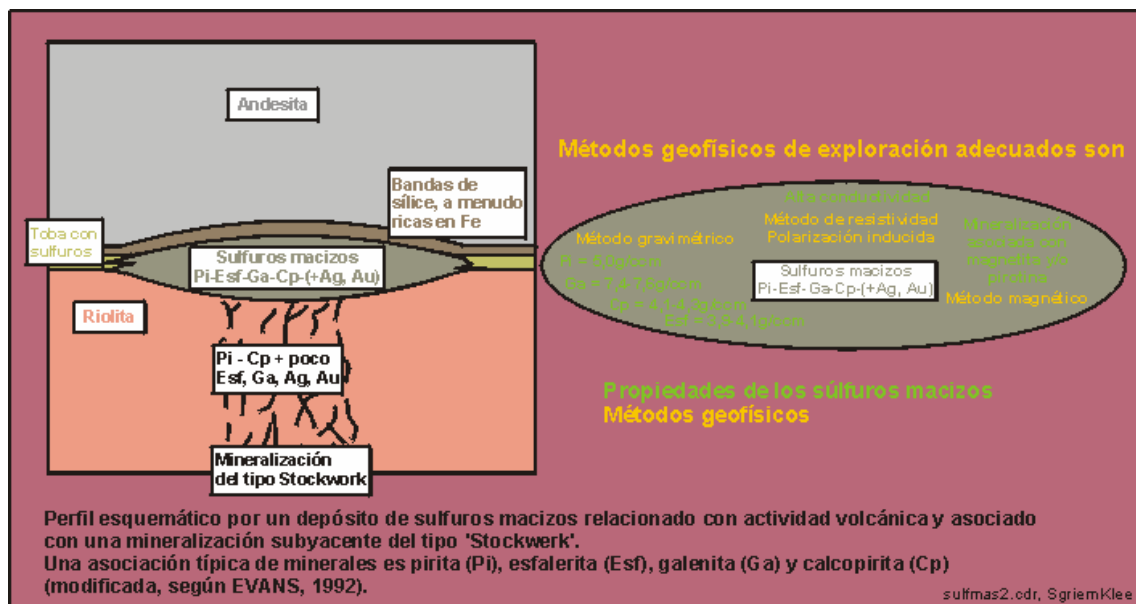
La tabla siguiente da una compilación de los métodos geofísicos principales de prospección, de sus parámetros importantes, las propiedades físicas mensurables, las causas principales para las anomalías, la eficacia de los métodos, sus costos y los métodos de interpretación correspondientes a cada método.

Campo de aplicación

Desde su introducción en los años 1920 los métodos geofísicos y entre ellos los métodos sísmicos jugaron un papel muy importante en la exploración del petróleo y de gas. Con respecto a la minería la aplicación de los métodos geofísicos da resultados exitosos en la localización de dos tipos de depósitos minerales: depósitos minerales de sulfuros, sean macizos o diseminados y depósitos de hierro. Además se exploran otros depósitos por los métodos geofísicos como depósitos de oro y de cromita pero con menos éxito.

Un depósito de sulfuros macizos de cinc, plomo y cobre que se constituye principalmente de calcopirita, pirita, esfalerita y galenita (según EVANS, 1992) está caracterizado por alta conductividad, alta densidad y frecuentemente por alta susceptibilidad magnética debido a la presencia de magnetita como mineral huésped. Los métodos electromagnéticos, de resistividad y de polarización inducida, el método gravimétrico y el método magnético son los métodos geofísicos más aptos para detectar y delinear este tipo de depósito.

La polarización inducida es el método más potente para descubrir los pórfidos cupríferos y de molibdeno con la asociación de minerales metálicos de calcopirita, calcosina, bornita, molibdenita y pirita.



Los depósitos de hierro de importancia económica se constituyen de magnetita y hematita. La magnetita tiene la susceptibilidad magnética más alta con respecto a todos los minerales y su presencia en un depósito mineral de hierro favorece la aplicación del método magnético. La hematita es de susceptibilidad magnética mucho menor, pero a menudo esta relacionada genéticamente o estratigráficamente con unidades litológicas con un contenido apreciable de magnetita. En estos casos el método magnético sirve también para detectar la hematita. En los pórfidos cupríferos del tipo diorita magnetita representa un mineral abundante, cuya alta susceptibilidad magnética se puede aprovechar para detectar el depósito mineral aplicando el método magnético.

Estos ejemplos ilustran el principio de la asociación. En el caso que la ganga o un mineral de interés subsidiario de un depósito mineral se puede detectar de manera más clara, primero se localizan la ganga o el mineral subsidiario para luego descubrir el depósito mineral.

El acceso a los depósitos macizos de sulfuros poli metálicos ubicados en chimeneas volcánicas en el fondo del mar todavía es difícil y requiere el desarrollo de nuevos técnicos mineros y del transporte.

Historia de los métodos geofísicos de prospección

Alrededor de 1640 la brújula magnética fue usada en la búsqueda de hierro. Como primero instrumento especialmente apto para la exploración aproximadamente 110 años atrás apareció la brújula minera de sueca, cuya aguja magnética está suspendida de tal manera, que puede rotar alrededor de su eje horizontal y de su eje vertical. Entre 1915 y 1920 entre varios instrumentos para la prospección magnética Adolf SCHMIDT desarrolló el variómetro, que lleva su nombre y que todavía ocasionalmente está en uso. La Segunda Guerra Mundial empujó el desarrollo de los magnetómetros aéroportados basándose en el principio electromagnético, puesto que los utilizaron para la detección de submarinos. Después de la guerra los magnetómetros aéroportados estuvieron disponibles para la exploración. El magnetómetro nuclear apareció en 1955, el magnetómetro de absorción atómica (con vapor de cesio y rubidio) en 1961 y entre 1960 y 1970 el gradiómetro magnético aéroportado.

En 1815 Robert Fox descubrió, que algunos minerales exhiben polarización espontánea. Un siglo más tarde en 1913 Carl SCHLUMBERGER podía localizar un depósito de sulfuros aplicando este método. Además introdujo los métodos de resistividad y de la línea equipotencial aptos para aplicaciones en el terreno. Durante la tercera década de este siglo 20 (1920-30) las configuraciones de electrodos múltiples fueron aplicadas en la prospección y Hans Lundberg introdujo los métodos electromagnéticos, que alrededor de 1947 fueron adaptados para ser usados en aviones. Después de la Segunda Guerra Mundial los métodos magnetoteléuticos y de la polarización inducida aparecieron, además en este tiempo se registra avances grandes en los métodos de interpretación, en particular con respecto a los métodos magnéticos y electromagnéticos.

El origen de los métodos sísmicos aplicados en la exploración como los métodos de refracción y de reflexión es la sismología o es decir la observación de las ondas sísmicas generadas por un terremoto. Los tiempos de llegada de las primeras ondas sísmicas generadas por un terremoto y detectadas en varios observatorios sismológicos se utilizan para localizar el epicentro del terremoto (proyección del hipocentro ubicado en la corteza terrestre a la superficie terrestre, el epicentro se ubica en la intersección del radio, que pasa por el hipocentro, con la superficie terrestre) y para hallar el tiempo de origen de este terremoto. En base de estas informaciones se puede presentar la distribución de las velocidades de las ondas sísmicas en función de la profundidad de tal manera aclarando la estructura interna de la Tierra. En 1909 el sismólogo MOHOROVICIC de Yugoslavia descubrió el límite entre la corteza y el manto, la llamativa discontinuidad de Mohorovicic o sólo Moho, que está caracterizada por un aumento apreciable en la velocidad de las ondas sísmicas p en una profundidad entre 5 (corteza oceánica) y 45 km (corteza continental). En 1913 GUTENBERG, nacido 1889 en Darmstadt/Alemania calculó el valor correcto de la profundidad del núcleo de la Tierra (2900km) con base en datos obtenidos por la sísmica de refracción.

Los métodos sísmicos de exploración fueron desarrollados a partir de la exploración petrolífera y de gas desde los años 1920. En 1923 el método de refracción fue introducido en la exploración petrolífera en México. Los métodos de reflexión se emplean rutinariamente desde 1927 en la exploración petrolífera (Maud field, Oklahoma) y ellos reemplazaron rápidamente los métodos de refracción en este campo.

Desde los años 70s casi no se emplean los métodos de refracción en la exploración petrolífera.

Remote Sensing

'Remote Sensing' se traduce con percepción o observación desde una distancia larga o como la observación de estructuras ubicadas en larga distancia con respecto al observador o detector respectivamente. La observación se realiza a través de un detector, que no está en contacto directo con el objeto investigado y que es sensible para las longitudes de onda electromagnética desde la parte ultravioleta del espectro electromagnético hasta la región ocupada por ondas cortas de radio.

'Remote Sensing' se ocupa de la producción, del procesamiento y de la interpretación de fotos aéreas y de imágenes de satélite. La interacción entre la energía electromagnética y la materia se determina por las propiedades físicas de la materia y por las longitudes de onda electromagnética incidente y detectada. 'Remote Sensing' se refiere a los métodos, que emplean energía electromagnética como las ondas de luz, las ondas térmicas y las ondas del radio por ejemplo. Además se aplican ondas sonoras (no son ondas electromagnéticas) en investigaciones subacuáticas.

Las fotos aéreas y su interpretación marcan los inicios de 'remote sensing'. Entre los años 1960 y 1970 las imágenes infrarrojas y la parte del espectro electromagnético ocupada por las microondas fueron introducidas. Además en esta década los primeros satélites fueron lanzados en órbitas. Hoy día las imágenes de satélite anteriormente guardadas como secretos militares son disponibles a la comunidad.

'Remote Sensing' se emplean para un reconocimiento general de un área, de las fotos aéreas principalmente se pueden deducir informaciones acerca de las formaciones geológicas, que afloran en la superficie terrestre y acerca de la geología estructural, las imágenes de satélite dan informaciones similares y además informaciones acerca de la composición de la materia de la superficie terrestre.

Prospección geotermal

Otro método de prospección aún menos común es la prospección geotermal, donde se miden el gradiente térmico de la corteza terrestre. El método es capaz de detectar una anomalía térmica, que podría ser relacionada por ejemplo con rocas volcánicas jóvenes, con fuentes termales, con magmatitas recién formadas o con zonas de alteración. Preferentemente se emplean la prospección geotermal en la búsqueda de fuentes energéticas termales.

Los métodos de exploración y su aplicación están compilados en la tabla siguiente.

Tabla: Clasificación de métodos geofísicos según HARTMAN, 1987 (modificado según VAN BLARICOM, 1980 y modificado por Griem-Klee).

Método	Parámetro medido		Propiedad física característica	Causas principales de anomalías	Aplicación	Equipo geofísico	Interpretación	
	Denominación	Unidad						
(A): activo (P): pasivo	Denominación	Unidad			Detección directa	Detección indirecta	Producción	
Resistividad (A)	Resistividad aparente	Ωm (= Ohm \times m)	Resistividad, conductividad	Diques conductivos, estratos sedimentarios, intrusiones volcánicas, zonas de cizalle, fallas, meteorización, aguas termales	Sulfuros macizos, arcilla bituminosa, arcillas, aguas termales	Elementos representativos, metales básicos, carbón, vapor natural.	Depende de la profundidad de investigación: Sondeo eléctrico: 20-250 exámenes/mes. Perfiles de resistividad: 20-100km/mes. Mapas de resistividad: 5-20km ² /mes.	Curvas corregidas, modelado por computadora
Polarización inducida (A)	Capacidad de carga, capacidad de polarizar efecto de frecuencia, cambio de fase	ms, % efecto de frecuencia miliradian	Sobretensión iónica-electrónica	Mineralizaciones conductivas: depósitos diseminados o macizos de grafito o sulfuros, arcillas	Depósitos conductivos: sulfuros, oxidos, oxidos de Mn.	Minerales asociados (Zn, Au, Ag, Sn, U, etc)	800-2000 estaciones de observación/mes. 20-70km/mes.	Curvas corregidas, modelado por computadora
Método	Parámetro medido		Propiedad física característica	Causas principales de anomalías	Aplicación	Equipo geofísico	Interpretación	
(A): activo (P): pasivo	Denominación	Unidad			Detección directa	Detección indirecta	Producción	
Potencial espontaneo	Potencial natural	mV	Conductividad, oxydabilidad	Depósitos macizos	Sulfuros (pirita,	Minerales asociados	2500-3500 estaciones de observación/mes.	Regla de Fleming, curvas corregidas,

(P)				conductivos, grafito, filtración eléctrica, fallas.	pirrotina, cobre), depósitos de Mn	(Pb, Au, Ag, Zn, Ni)	60-200km/mes.	interpretación visual
Potencial aplicado (A)	Potencial aplicado	mV	Conductividad	Dimensión de depósitos minerales conductivos anteriormente localizados	Depósitos minerales conductivos	Minerales asociados (Zn, Sn)	5-15km ² /mes.	Reducción y modelado por computadora, interpretación visual
Método telúrico (P)	'Relative ellipse area' Cocientes - resistividad aparente	Ω m	Conductividad	'Basin and range studies', conductividad de series sedimentarios, domos de sal, aguas geotermales	Estudios estructurales, vapor	Exploración regional	20-500km ² /mes.	Reducción y modelado por computadora, interpretación visual
Método	Parámetro medido		Propiedad física característica	Causas principales de anomalías	Aplicación		Equipo geofísico	Interpretación
(A): activo (P): pasivo	Denominación	Unidad			Detección directa	Detección indirecta	Producción	
Método magneto-telúrico (A,P)	Impedancia aparente (resistividad y fase)	Ω m, grados	Resistividad, conductividad	Diques conductivos, capas sedimentarias, zonas de cizalle, fallas, meteorización, rocas con resistencia interna,	Sulfuros macizos, arcillas, corrientes naturales	Zonas de cizalla, tectónica general, estructuras generales	3 a 20 estaciones de observación/día.	Reducción por computadora, 'computer inversion', interpretación visual

				depósitos minerales estratificados				
Método electromagnético	Variación de fase Ángulo de inclinación Cociente de amplitud Registro de la curva de descomposición inducida en un carrete por corrientes de Foucault Componentes en fase y no en fase	grados, $\Omega m, \sigma \times t$	Conductividad eléctrica	Mineralizaciones conductivas, conductores superficiales, zonas de cizalla.	Depósitos minerales conductivos (sulfuros, óxidos) óxidos de Mn	Kimberlitas, minerales asociados, 'ground followup' (Pb, Ni), zonas de cizalla, zonas meteorizadas. Mapas de conductividad	50-150km/mes. 6000-10000km/mes.	Curvas corregidas, interpretación visual
Método	Parámetro medido		Propiedad física característica	Causas principales de anomalías	Aplicación		Equipo geofísico	Interpretación
(A): activo (P): pasivo	Denominación	Unidad			Detección directa	Detección indirecta	Producción	
Método magnético (P)	Campo geomagnético Componente vertical Z Intensidad total Gradiente horizontal Gradiente	1γ (gamma) = $10^{-5} \Gamma$ (gauss)	Susceptibilidad magnética	Contraste de magnetismo, contenido de magnetita en los materiales	Magnetita, pirrotina, titanomagnetita	Mb, depósitos de Fe, cromita, depósitos de Cu, kimberlitas, asbestos. Mapeo geológico con respecto a	4000-8000estaciones de observación/mes. 80-300km/mes (onshore). 20-80km/día(offshore). 1000-15000km/mes.	Reducción por computadora, regla de Fleming, modelado por computadora, 'computer inversión', interpretación visual

	vertical					variaciones magnéticas (rocas básicas, etc.)		
Gravimetría (P)	Campo gravitacional	miligal (1gal=1cm/s ²)	Densidad	Depósitos de minerales pesados, domos de sal, rocas del 'basement'	Cromita, pirita, calcopirita, plomo	Configuración de placeres, cavernas kársticas, topografía del 'basement', estructuras	400-1500estaciones de observación/mes. 20-50estaciones de observación/día. Combinación con la sísmica.	Reducción por computadora, modelado por computadora, 'computer inversión', curvas corregidas
Método	Parámetro medido		Propiedad física característica	Causas principales de anomalías	Aplicación		Equipo geofísico	Interpretación
(A): activo (P): pasivo	Denominación	Unidad			Detección directa	Detección indirecta	Producción	
Método radiométrico (P)	Intensidad y composición espectral de rayos gamma	counts/s	Radioactividad	Elementos radioactivos: U-Th-K40	U, Th, fosfatos.	'Ground followup', mapeo geológico y estructural (diferenciación en granitos).	80-400km/mes,superficie 1000-15000km/mes,aire.	Interpretación por computadora. 'Computer inverted'.
Sísmica- por: - refracción (A) -reflexión (A)	Tiempo de propagación de ondas sísmicas	ms m/s	Velocidad de las ondas sísmicas. Modulo dinámico	Contraste de velocidad, rocas con diaclasas	Canales escondidos, fallas, trampas morfológicas, topografía del 'basement'	Sn, diamantes, minerales pesados, vapor natural, U	10-50km/mes(onshore) 10-40km/día(offshore).	Interpretación por computadora. 'Computer inverted'

Método geoquímico de exploración

Definición

El método geoquímico de exploración o prospección respectivamente es un método indirecto. La exploración geoquímica a minerales incluye cualquier método basándose en la medición sistemática de una o varias propiedades químicas de material naturalmente formado. El contenido de trazas de un elemento o de un grupo de elementos es la propiedad común, que se mide. El material naturalmente formado incluye rocas, suelos, capas de hidróxidos de Fe formadas por meteorización llamadas 'gossan', sedimentos glaciares, vegetación, sedimentos de ríos y lagos, agua y vapor. La exploración geoquímica está enfocada en el descubrimiento de distribuciones anómalas de elementos.

Se distingue los estudios geoquímicos enfocados en un reconocimiento general y los estudios geoquímicos más detallados aplicados en un área prometedora para un depósito mineral. Además se puede clasificarlos con base en el material analizado.

Historia

El principio fundamental de la prospección geoquímica, que el ambiente de un depósito mineral está caracterizado por propiedades conspicuas y diagnósticas ya está conocido y es aplicado desde el tiempo, en que el ser humano empezó a explotar metales.

Los análisis de elementos trazas por espectrógrafo fueron aplicados a muestras de suelos y plantas en las medias de 1930. Entre 1940 y 1950 con los avances en los análisis hidroquímicos y en la espectrografía en los Estados Unidos y en Canada se desarrollaron métodos más económicos y más efectivos de prospección geoquímica. A partir de 1950 los métodos geoquímicos fueron aplicados en otros países del mundo.

Los estudios geoquímicos de los suelos (hoy día el método más avanzado) y de la vegetación iniciaron en la década de 1930 a 1940, en las medias de 1950 se podían emplear los estudios geoquímicos de drenaje en una forma rutinaria. Además entre 1950 y 1960 se realizaron muestreos sistemáticos de rocas alteradas y frescas y a partir de 1960 se introdujeron varios métodos de prospección geoquímica para rocas, especialmente en la Unión Soviética antigua. Las mediciones de gases de suelos y atmosféricos todavía están en desarrollo.

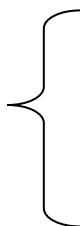
Reconocimiento general

Por medio de una cantidad pequeña de muestras o es decir mediante un muestreo lo menos costoso como posible se quiere localizar sectores favorables en un área extendida y reconocida en grandes rasgos. Las áreas de 10 a 1000 km² se evalúan a

menudo con una muestra por 1km² a una muestra por 100km². Un método geoquímico apto para el reconocimiento general es la localización de provincias geoquímicas y su delineación. Si existe una correlación entre la probabilidad de la presencia de las menas y la abundancia media de un elemento en una roca representativa para una región o la abundancia media de un elemento en distintos tipos de rocas se puede establecer una red de muestreo con un espaciamiento amplio y analizar las muestras para ubicar las áreas con valores elevados en comparación con la abundancia media del elemento en interés.

Prospección Geoquímica

Materiales



Rocas, suelos, sed. de corrientes
Aguas, subterráneas y superficiales
Materiales Orgánicos
Gases

Los estudios se realizan principalmente sobre:

- Elementos minoritarios y trazas < 10% en la corteza terrestre
- En menor grado en elementos mayoritarios, Ej: Al, Fe, Ca, K, Na y Mg
- Las concentraciones son en ppm o ppb

El muestreo geoquímico para exploración se realiza a:

Escala Regional > a 1000 Km²
Escala Local > ≈ 500 Km²
Escala de Mina = pocas hectáreas

Estudios geoquímicos detallados

El objetivo de un reconocimiento detallado es la delineación y la caracterización geoquímica del cuerpo mineralizado en la manera más precisa como posible. Para localizar el cuerpo mineralizado se requiere un espaciamiento relativamente estrecho, usualmente entre 1 y 100m. Debido a los altos costos relacionados con un

espaciamiento estrecho se emplea los estudios geoquímicos detallados áreas limitadas de interés particular seleccionadas en base de los antecedentes geoquímicos, geológicos y geofísicos disponibles.

Los métodos comúnmente empleados en estudios detallados son los siguientes:

- El muestreo sistemático de suelos residuales se utiliza para buscar anomalías situadas directamente encima del cuerpo mineralizado debido a su sencillez y a la ventaja, que la composición del suelo residual depende altamente del cuerpo mineralizado subyacente.
- El muestreo de suelos se emplea para localizar anomalías desarrolladas en material transportado, que se ubica encima de un cuerpo mineralizado. El grado, en que la anomalía depende del cuerpo mineralizado subyacente, es mucho menor en comparación con el método anterior. Por medio de un muestreo profundo se puede comprobar, si existe una relación geoquímica entre el suelo y el cuerpo mineralizado subyacente o no.
- El muestreo de plantas puede ser recomendable bajo circunstancias, que impiden la aplicación del muestreo de suelos como por ejemplo en áreas cubiertas con nieve o en áreas, donde las raíces de las plantas penetran profundamente una capa de material transportado. Aún este método es complejo y costoso. La complejidad se debe entre otros factores al reconocimiento y al muestreo de una sola especie de planta en el área de interés, a la variabilidad del contenido metal, que depende de la edad de la planta y de la estación del año y al procedimiento analítico de las plantas.
- El muestreo de rocas está enfocado en la detección de anomalías de corrosión o difusión. Las anomalías de corrosión se pueden encontrar en las rocas de caja y en el suelo residual, que cubren el cuerpo mineralizado. Las rocas de cajas caracterizadas por una anomalía de difusión se obtienen por ejemplo a través de una perforación.
- Un método en desarrollo es el muestreo de gases de suelos y de constituyentes atmosféricos. Se lo aplica para detectar cuerpos mineralizados cubiertos con una capa ancha de suelo.

Tipos de muestras y su aplicación

Las muestras de sedimentos de ríos y lagos, de aguas de ríos, de lagos y de fuentes y de sondeos son los tipos de muestras más eficientes y los más empleados. Especialmente esto vale para los sedimentos de ríos, que se puede aplicar para la búsqueda de la mayoría de los metales. La exploración geoquímica basándose en muestras de aguas está más limitada a los elementos solubles. Las muestras de sedimentos de ríos se utilizan con alta frecuencia en la exploración por su manejo sencillo, por sus costos bajos por unidad de área y por su alto grado de confianza. En áreas glaciares la dispersión de clastos visibles o de trazas mensurables de metales en acarreo glaciárico se utilizan exitosamente para la detección de depósitos minerales. Los análisis de suelos son de costos altos por unidad de área, además las anomalías de suelos residuales por ejemplo, que son relacionadas con depósitos minerales en el subsuelo normalmente son de extensión local. Pero como generalmente la composición de un suelo autóctono depende estrechamente de su substrato o es decir de las rocas, que

las cubre, se emplean este método con alta frecuencia en áreas ya identificadas como áreas favorables. La composición química de plantas y la distribución de especies de plantas, que prefieren suelos de composición anómala pueden servir igualmente en estudios de reconocimientos. Plantas o asociaciones de plantas únicamente relacionadas con menas se pueden identificar visualmente desde el aire, por medio de fotos aéreas o por medio de imágenes de satélite.

Conceptos básicos

Según la definición original de GOLDSCHMIDT (en ROSE et al. 1979) la geoquímica se ocupa de dos ramos:

1. la determinación de la abundancia relativa y absoluta de los elementos de la tierra y
2. el estudio de la distribución y de la migración de elementos individuales en varias partes de la tierra con el objetivo de descubrir los principios, que controlan la distribución y la migración de los elementos.

Los pasos de una exploración geoquímica

1. Selección de los métodos, de los elementos de interés, de la sensibilidad y la precisión necesarias y de la red de muestreo. Las selecciones se toma con base en los costos, los conocimientos geológicos, la capacidad del laboratorio disponible y una investigación preliminar o las experiencias con áreas parecidas.
2. Programa de muestreo preliminar, que incluye análisis inmediato de algunas muestras tomadas en la superficie y en varias profundidades en el subsuelo para establecer los márgenes de confianza y para evaluar los factores, que contribuyen al ruido del fondo.
3. Análisis de las muestras en el terreno y en el laboratorio, incluido análisis por medio de varios métodos.
4. Estadísticas de los resultados y evaluación geológica de los datos tomando en cuenta los datos geológicos y geofísicos.
5. Confirmación de anomalías aparentes, muestreo encauzado en áreas más pequeñas (red de muestreo con espaciamiento corto), análisis de las muestras y evaluación de los resultados.
6. Investigación encauzada con muestreo y análisis adicionales de muestras tomadas en un paso anterior.

Elemento indicador, elemento explorador

Elemento indicador, indicador directo o elemento blanco ('target element') se refiere a uno de los elementos principales del depósito mineral, que se espera encontrar.

Elemento explorador o elemento pionero ('pathfinder element') se refiere a un elemento asociado con el depósito mineral, pero que puede ser detectado más fácilmente en comparación al elemento blanco, que puede ser dispersado en un área más extendida y que no está acompañado por tanto ruido de fondo en comparación al elemento blanco. La selección de un elemento explorador requiere un modelo del depósito mineral, que se espera descubrir. Arsénico (As) por ejemplo puede presentar un elemento explorador para la búsqueda de cobre (Cu) en un depósito macizo de sulfuros, pero no es un elemento explorador para cada tipo de depósito de cobre.

Tabla : Elementos indicadores y exploradores de algunos tipos de depósitos minerales

Asociación de menas	Elemento indicador	Elemento explorador
Pórfido cuprífero	Cu, Mo	Zn, Au, Re, Ag, As, F
Depósitos complejos de sulfuros	Zn, Cu, Ag, Au	Hg, As, S (en forma de SO ₄), Sb, Se, Cd, Ba, F, Bi
Vetas de metales preciosos	Au, Ag	As, Sb, Te, Mn, Hg, I, F, Bi, Co, Se, Tl
Depósitos del tipo 'Skarn'	Mo, Zn, Cu	B, Au, Ag, Fe, Be
Uranio en areniscas	U	Se, Mo, V, Rn, He, Cu, Pb
Uranio en vetas	U	Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni, Pb, F
Cuerpos ultramáficos de oro	Pt, Cr, Ni	Cu, Co, Pd
Vetas de fluorita	F	Y, Zn, Rb, Hg, Ba

Proporciones de isótopos estables también pueden servir para indicar un depósito mineral, por ejemplo Pb, S y Sr están distribuidos en zonas alrededor de algunos depósitos minerales y las variaciones en la composición de carbón y oxígeno pueden indicar la proximidad de un depósito mineral del tipo Mississippi Valley.

Anomalía geoquímica

Una anomalía es una desviación con respecto a la norma. Una anomalía geoquímica es una variación de la distribución geoquímica normal correspondiente a un área o a un ambiente geoquímico. Una anomalía se expresa por medio de números, que se puede separar de un grupo más amplio de números constituyendo el fondo geoquímico. Para ser detectada una anomalía tiene que desviar claramente de este fondo.

En sentido estricto un depósito mineral como un fenómeno escaso y anómalo por su mismo es una anomalía geoquímica. La distribución geoquímica relacionada con la génesis o la erosión del depósito mineral también es una anomalía.

Las anomalías relacionadas con un depósito mineral, que se puede usar como guías para el depósito mineral se denominan anomalías significantes. Generalmente las anomalías tienen valores que exceden los valores del fondo. Anomalías negativas, cuyos valores son menores que aquellos del fondo, apenas sirven para la búsqueda de depósitos minerales. Desdichadamente las concentraciones altas de elementos indicadores pueden ser causadas por una mineralización no económica o por procesos geológicos o geoquímicos no relacionados con una mineralización. El término 'anomalía no significativa' se refiere a estas anomalías no relacionadas con un depósito mineral.

Otros factores de una anomalía geoquímica de importancia son el marco topográfico y la asociación geológica.

En el caso de anomalías detectadas en suelos hay que tomar en cuenta, que estos podrían ser desplazados de su substrato mineralizado por deslizamiento del suelo (creeping en inglés). Solamente una anomalía detectada en un suelo residual en terreno plano o sobre un cuerpo verticalmente inclinado puede ubicarse directamente encima de un depósito mineral.

Anomalías hidromórficas se producen por la precipitación de material en lugares, donde el agua subterránea alcanza la superficie, por ejemplo en un pantano (en un orificio de desague = seep o shallow hole en inglés).

Tipos de anomalías geoquímicas

Anomalías epigenéticas en las rocas de caja

Las anomalías epigenéticas se describe como aureolas químicas, mineralógicas e isotópicas generadas por los procesos de mineralización, de escape y de lixiviación de los elementos a través de los fluidos, que causan la mineralización y que pasan por canales desde el cuerpo mineralizado hacia las rocas de caja. Estas anomalías están superimpuestas a las rocas preexistentes y se ubican en las rocas de caja de un cuerpo mineralizado. El desarrollo más extensivo de anomalías epigenéticas se observa cerca de depósitos hidrotermales y canales de transporte de fluidos. La viscosidad baja de los fluidos favorece su penetración a lo largo de fracturas y por intersticios de la roca hacia la roca de caja. Las anomalías epigenéticas están caracterizadas por cantidades anómalas de elementos distribuidas cerca de canales hidrotermales, por la alteración hidrotermal de minerales de las rocas de caja y la lixiviación de elementos en sectores del corrido de los fluidos formadores de la mineralización. Factores, que controlan la formación de las aureolas son entre otros los gradientes de temperatura, el estado de oxidación de los iones involucrados, la movilidad de los elementos participantes, los sistemas de fracturas, la permeabilidad y la reactividad de las rocas.

Anomalía causada por difusión de elementos

Una aureola de difusión se genera por la difusión de metales disueltos por fluidos intersticiales estacionares hacia la roca de caja de un cuerpo mineralizado como una veta o un dique por ejemplo. Los metales disueltos subsecuentemente son precipitados en o absorbidos por la roca de caja.

Los constituyentes disueltos en un fluido realizan movimientos atómicos al azar y tienden a difundir hacia las regiones de concentración más baja. Debido a la velocidad extremadamente pequeña de la difusión el efecto de difusión normalmente es mucho menor en comparación con aquel de la infiltración. En comparación con el efecto de un fluido moviéndose con una velocidad de 0,001mm/s (= 32m/año) por ejemplo el efecto de difusión es despreciable (ROSE et al. 1979). En ausencia de un gradiente alto de presión o de una salida hacia una zona permeable el fluido solo podrá pasar lentamente por los poros finos y fracturas de la roca y el efecto de la difusión podría ser significativo.

La naturaleza de una aureola formada por difusión y por absorción y precipitación depende de los factores siguientes:

- Concentración del elemento difundiéndose desde su fuente: una concentración inicial alta resulta en valores altos a lo largo de un perfil de concentración trazado a partir de la fuente del elemento o es decir a partir del cuerpo mineralizado hacia la roca de caja; una variación de la concentración del elemento en la fuente también influye la difusión.
- Intervalo de tiempo, en que puede actuar la difusión: tanto más tiempo disponible, tanto más extendida será la aureola de difusión.
- Naturaleza de reacciones con la roca de caja: en una roca de caja reactiva se desarrollará una aureola pequeña, caracterizada por altas concentraciones de elementos; en una roca de caja menos reactivo se desarrollará una aureola de difusión más extendida con concentraciones de elementos más bajas.
- Porosidad y permeabilidad de la roca de caja: una roca de caja con alta porosidad y con poros conectados entre sí tiende a hospedar aureolas más extendidas en comparación con una roca menos porosa.
- Valor de la constante de difusión característica para la especie química (elemento, molécula) y para las condiciones químicas respectivas: generalmente iones pequeños y temperaturas altas tienden a favorecer aureolas grandes.

Anomalía de corrosión o de lixiviación

Un halo de corrosión (leakage en inglés) se causa por fluidos, que pasan por vetas, fracturas y intersticios de la roca y cuyos metales disueltos subsecuentemente son precipitados o absorbidos. Este tipo de transporte se denomina infiltración, las anomalías resultantes se llama anomalías de corrosión o de lixiviación.

La ubicación, las dimensiones y la intensidad de una anomalía de corrosión dependen de los factores siguientes:

- Corrido del fluido mineralizado: Zonas de fracturas o de alta porosidad en la roca figuran zonas permeables, que favorecen un recorrido rápido en comparación al corrido a lo largo de bordes de granos o en poros de rocas macizas. Normalmente el corrido de los fluidos hidrotermales está dirigido hacia

arriba debido a las presiones elevadas presentes en altas profundidades, sin embargo no se excluye corridos horizontales o dirigidos hacia abajo.

- Concentración de los elementos indicadores en el fluido mineralizado: BARNES & CZAMANSKE (1967, en ROSE et al., 1979) estiman, que los fluidos formadores de los depósitos de los metales básicos comunes, contienen metales en rangos entre 1ppm y 1000ppm. En comparación las aguas superficiales y subterráneas normalmente están caracterizadas por concentraciones en Cu, Pb y Zn de aproximadamente 0,01ppm.
- Influencia de precipitación, absorción, intercambio iónico y de otros procesos al transferir los elementos indicadores de su forma disuelta en el fluido hidrotermal hacia una fase sólida en la roca.

Prácticamente los dos efectos anteriormente descritos, la difusión y la infiltración pueden contribuir a la formación de una anomalía.

Distribución de los elementos por zonas en depósitos minerales epigenéticos y en sus aureolas

Los depósitos minerales epigenéticos y sus aureolas pueden ser caracterizados por una distribución de elementos por zonas. Las proporciones de pares de elementos varían gradual- y progresivamente en función con la distancia o de la posición respecto al depósito mineral debido a variaciones en las condiciones de deposición y en el fluido, que genera la mineralización. Las proporciones de metales pueden proveer un medio indicador para la dirección, en que la mineralización se ubica o se vuelve mas rica, y un medio para distinguir las raíces de la mineralización de anomalías, que superponen la mineralización.

Anomalías en suelos residuales

El objetivo del estudio geoquímico de suelos consiste en el reconocimiento de la distribución primaria de elementos seleccionados en las rocas subyacentes. En los suelos residuales generalmente la distribución primaria se expresa todavía en forma relativamente clara, aún estará modificada por los efectos de varios procesos superficiales. Algunos de estos procesos tienden a homogeneizar el suelo y por consiguiente borrar la distribución primaria como entre otros la helada, la actividad de plantas, la gravedad, la disolución local y la redeposición. Otros procesos contribuyen a la formación de horizontes verticalmente diferenciados o es decir favorecen la formación de un suelo. Otros procesos, que tienden a borrar la distribución primaria, son la remoción de elementos mediante la meteorización y la formación del suelo (corrosión por agua meteórica, ascenso por plantas) y la adición de elementos (por deposición del agua subterránea, adición de elementos provenientes de la desintegración de vegetación, por polvos, elementos disueltos en agua meteórica).

Anomalías en 'gossan' y cubiertas afectadas por corrosión y lixiviación

'Gossan' se refiere a un producto de meteorización, que contiene Fe y que se sitúa encima de un depósito de sulfuros. Se forma por oxidación de los sulfuros y por la lixiviación del azufre y la mayoría de los metales dejando como únicos remanentes hidróxidos de Fe (limonita por ejemplo) y raramente algunos sulfatos (definición según BATES & JACKSON, 1984).

Capas de limonita residual y otros productos de meteorización de sulfuros de Fe usualmente pueden figurar guías valiosas hacia menas en áreas caracterizadas por meteorización profunda y cubiertas residuales. Desdichadamente se puede confundir fácilmente los productos de meteorización de menas con aquellos de rocas comunes. Los estudios de elementos trazas son útiles para distinguir entre menas meteorizadas y los productos de meteorización de otras formaciones geológicas como por ejemplo de pirita de formación hidrotermal o singenética o de carbonatos de Fe.

Las cubiertas alóctonas se constituyen de depósitos glaciares, de depósitos aluviales y coluviales, de turba, de sedimentos eólicos y material piroclástico. Una cubierta alóctona impide la observación directa de un depósito mineral subyacente. Los estudios de trazas de metales en la cubierta transportada pueden contribuir al descubrimiento de un depósito mineral escondido.

En cubiertas alóctonas se distingue anomalías geoquímicas singenéticas y epigenéticas. La anomalía singenética se forma simultáneamente con el depósito de material transportado. La anomalía epigenética se refiere a una distribución de uno o varios elementos introducida en el depósito de material transportado subsecuentemente a su formación. Ambos tipos de anomalías pueden ocurrir juntos en una cubierta alóctona y pueden superponerse mutuamente.

Anomalías en agua

Una distribución anómala de elementos en aguas subterráneas y meteóricas se denomina anomalía hidrogeoquímica. Como generalmente los elementos son transportados en forma disuelta en las aguas naturales, los elementos más aptos para la exploración geoquímica de aguas son los elementos relativamente móviles.

Una aplicación muy exitosa de la exploración geoquímica de aguas consiste en la determinación de U en aguas subterráneas y meteóricas.

Anomalías en sedimentos de drenaje

A los sedimentos de drenaje pertenecen los sedimentos de manantiales, de lagos, de llanuras de inundación, los sedimentos activos de corrientes de agua y los sedimentos, que funcionan como filtros para el agua (seepage sediments en inglés).

Los sistemas de drenaje a menudo parten de manantiales. Los sedimentos situados en la cercanía de los manantiales y los sedimentos de filtración tienden a exhibir anomalías apreciables y por consiguiente estos sedimentos son útiles para una exploración geoquímica. Los sedimentos activos de corrientes de agua incluyen material clástico y hidromórfico de los sectores de filtración, el material clástico erosionado de los bancos de material detrítico situados en los lechos de los ríos y de material hidromórfico absorbido o precipitado por el agua de la corriente. Las anomalías desarrolladas en estos sedimentos activos pueden extenderse varios diez de kilómetros con respecto a su fuente. Los estudios de estas anomalías se utilizan frecuentemente y preferentemente para lograr un reconocimiento general. En el caso de los lagos se estudia los componentes clásticos y el material absorbido o precipitado de los sedimentos. En áreas con una alta cantidad de lagos como en el área del escudo precámbrico de Canadá modelado por glaciares el estudio geoquímico de los

sedimentos de lagos puede ser el método más económico y efectivo para un reconocimiento general.

Mineralización primaria y halo geoquímico secundario

Las prospecciones geoquímica y geobotánica se basan en el conocimiento, que generalmente una mineralización primaria envuelve un depósito mineral y una asociación secundaria de elementos químicos se forma durante la meteorización y erosión del depósito mineral. El envuelto de la mineralización primaria y la asociación secundaria de los elementos químicos pueden formar anomalías geoquímicas.

El envuelto de la mineralización primaria, el halo geoquímico (aureola geoquímica) o litogeoquímico primario puede corresponder a una alteración o a una distribución por zonas. Las dimensiones de los halos varían de centímetros a kilómetros en depósitos minerales grandes a varios cientos de metros y kilómetros en distritos mineros. Por ejemplo a Tynagh y Navan en Irlanda las zonas de contenidos anómalamente altos de zinc (Zn) se extienden 1 km con respecto al depósito mineral y los halos de manganeso (Mn) se extienden más de 10 km debajo y 300 m arriba del depósito mineral.

El halo geoquímico secundario contiene residuos de la mineralización por menas y puede ser detectado en muestras de rocas, suelo, sedimentos, y agua, que se toman en distancias de metros a varias diez de kilómetros con respecto al depósito mineral. En algunos casos elementos dispersados del depósito mineral fueron reconcentrados formando un depósito mineral supergéneo o formando anomalías de elementos trazas, que interfieren con el esquema general de distribución de los elementos más estrechamente relacionados con el depósito mineral.

Los datos obtenidos pueden tener:

- Componentes de fondo
- Componentes anómalos

Fondo, valores normales del fondo, valor umbral

El término 'fondo' se refiere a la abundancia normal de un elemento en los materiales terrestres no mineralizados. Considerando dos diferentes tipos de materiales terrestres la abundancia normal de un distinto elemento en un tipo de material terrestre muy probablemente difiere de su abundancia en otro tipo de material terrestre. Por ejemplo el contenido medio en K_2O de granitos es 5,46 % en peso, de basaltos es 0,82% en peso (según NOCKOLDS, 1954). La distribución de un distinto elemento en un material terrestre apenas es uniforme. Por esto se recomienda considerar el fondo como un intervalo de valores en vez de tratarlo como un valor absoluto, incluso cuando se

observa un ambiente relativamente uniforme. La naturaleza del ambiente por su mismo puede influir la distribución, puesto que bajo distintas condiciones unos elementos pueden ser enriquecidos y otros pueden ser empobrecidos. Por consiguiente en el estudio de muestras de un área no conocida se debería determinar o por lo menos tener en cuenta el rango de los valores del fondo.

En el laboratorio las variaciones en la preparación de las muestras, en los análisis del laboratorio y en los reactivos contribuyen al fondo o al ruido del fondo respectivamente. Respecto al depósito mineral procesos, que modifican el depósito mineral como la migración irregular de fluidos, la meteorización y la erosión influyen el ruido de fondo. En el terreno efectos antropogénicos, como la contaminación del ambiente forman parte del ruido de fondo. Además la influencia de la morfología y la estructura geológica del terreno pueden contribuir al ruido de fondo.

La tabla siguiente presenta la composición media de las rocas ígneas. La figura ilustra el rango de algunos elementos de los subgrupos del sistema periódico con base en la composición media de seis tipos de rocas principales como las rocas ígneas ultramáfica, máfica y granítica, la arenisca, la caliza y la pelita.

Tabla: Abundancia normal de los elementos químicos en rocas de la corteza terrestre (de ROSE et al., 1979)

Elemento	Símbolo	Abundancia en ppm	Elemento	Símbolo	Abundancia en ppm
Bromo	Br	1,8	Mercurio	Hg	0,02
Cadmio	Cd	0,1	Molibdeno	Mo	1,5
Calcio	Ca	33000	Niobio	Nb	20
Carbono	C	230	Níquel	Ni	75
Cerio	Ce	81	Oro	Au	0,003
Cesio	Cs	3	Oxígeno	O	473000
Cinc	Zn	2	Paladio	Pd	0,01
Circonio	Zr	150	Plata	Ag	0,05
Cloro	Cl	130	Platino	Pt	0,0005
Cobalto	Co	25	Plomo	Pb	10
Cobre	Cu	50	Potasio	K	25000
Cromo	Cr	100	Renio	Re	0,0006
Escandio	Sc	13	Rubidio	Rb	150
Estaño	Sn	80	Selenio	Se	0,1
Estroncio	Sr	300	Silicio	Si	291000
Flúor	F	600	Sodio	Na	25000
Fósforo	P	900	Talio	Tl	0,45
Galio	Ga	26	Tantalio	Ta	2
Germanio	Ge	2	Telurio	Te	0,002
Hafnio	Hf	3	Titanio	Ti	4400
Hierro	Fe	46500	Torio	Th	10
Indio	In	0,1	Uranio	U	2,5
Lantano	La	25	Vanadio	V	150
Litio	Li	30	Volframio	W	1
Magnesio	Mg	17000	Yodo	I	0,15
Manganeso	Mn	1000			

En base de la abundancia normal de los elementos en la corteza terrestre se puede calcular el factor de enriquecimiento o es decir el factor, conque se debe multiplicar la abundancia normal de un elemento en la corteza terrestre para obtener una

concentración económicamente explotable. El cutoff grade para un elemento designa la concentración mínima de la mineralización, que todavía se puede explotar económicamente. Con el cutoff grade variándose por la situación económica mundial o por otros factores variaría el factor de enriquecimiento asimismo. En la tabla siguiente se da a conocer la abundancia normal en la corteza terrestre, los cutoff grades y factores de enriquecimiento para algunos elementos (de PETERS, 1980). La abundancia normal de algunos elementos difiere ligeramente de los valores dados en la tabla anterior por el uso de otra base de datos y por su carácter variable (intervalos, rangos).

Tabla: Factores de enriquecimiento de algunos elementos (de PETERS, 1980)

Metal	Abundancia en la corteza terrestre en %	Cutoff grade en %	Factor de enriquecimiento
Hg	0,0000089	0,2	22500
Pb	0,0013	4	3100
Sn	0,00017	0,5	2900
W	0,00011	0,2	1800
Au	0,00000035	0,0003	900
Mo	0,00013	0,1	800
U	0,00017	0,1	600
Zn	0,0094	3	300
Cu	0,0063	0,3	50
Ni	0,0089	0,3	35
Fe	5,8	30	5
Al	8,3	30	4

Aún el oro es el elemento más escaso, no lleva el factor de enriquecimiento más alto. Al mercurio pertenece el factor de enriquecimiento máximo. El hierro y el aluminio están caracterizados por los factores de enriquecimiento menores.

El valor umbral designa la concentración de un elemento indicador sobre que una muestra se puede considerar anómala. En el caso más sencillo el valor umbral coincide con el límite superior de los valores del fondo, los valores mayores son anomalías, los valores menores pertenecen al fondo. En casos más complejos se puede definir dos o tres valores umbrales. A veces las anomalías relacionadas con un depósito mineral superponen un fondo caracterizado por un valor umbral elevado (en comparación a los valores umbrales comunes). Este fondo forma un relieve geoquímico definido por un valor inferior correspondiente al fondo regional y por un valor umbral regional, que lo separa de un nivel superior de valores elevados generado por una mineralización o dispersión extendida. De este nivel superior parten las anomalías más estrechamente relacionadas con el depósito mineral, las cuales están definidas por un valor umbral local. El reconocimiento de los valores umbrales regional y local puede ser

de importancia extremadamente grande en la prospección geoquímica. A partir de este reconocimiento se puede dirigir la búsqueda detallada de los altos de la anomalía local al nivel determinado por el valor umbral superior, que fue delineado por medio de una red de muestreo de espaciamiento grande (con fig.). Por el relieve geoquímico se puede expresar la intensidad de la anomalía geoquímica con respecto al fondo geoquímico local proporcionando las intensidades de la anomalía y del fondo geoquímica local.

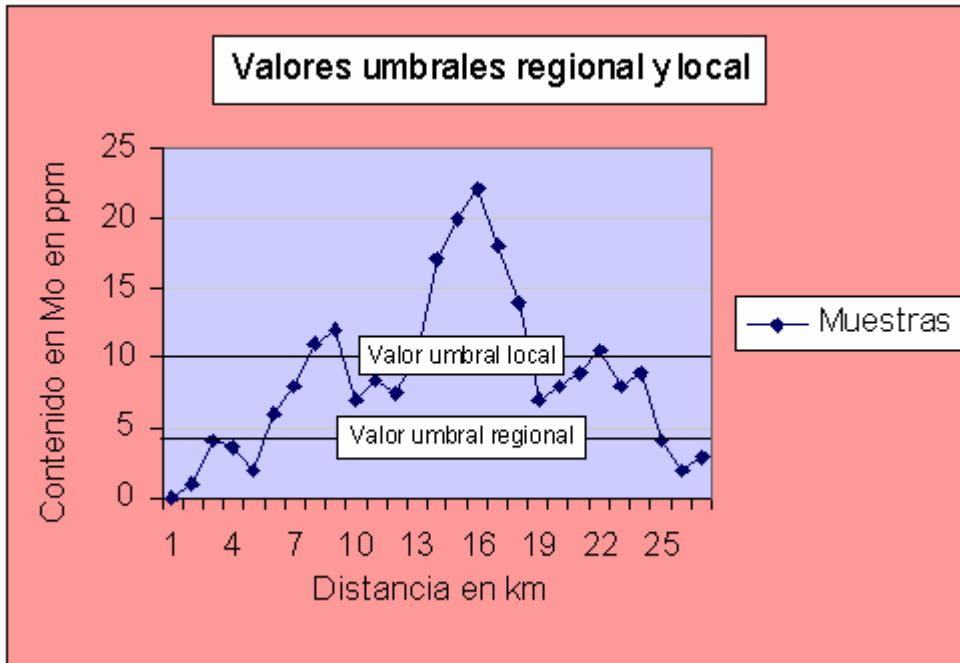


Fig.: Valores umbrales regional y local. El fondo regional está limitado por un valor umbral de 5 ppm molibdeno (Mo), el valor umbral del fondo local es 10 ppm Mo. La anomalía local alcanza un tope de 22 ppm Mo.

La intensidad de la anomalía se puede expresar como cociente entre el alto de la anomalía y el valor medio del fondo o el valor umbral del fondo.

Por el relieve geoquímico se expresa la intensidad de la anomalía geoquímica con respecto al fondo geoquímico local proporcionando las intensidades de la anomalía y del fondo geoquímico local.

- Los elementos trazas tienen distribución log-normal
- Relieve de fondo y anomalías
- Métodos analíticos → Método de Lepeltier (Log-normal)
Media, umbral y anomalía

Anomalías: pueden ser → Positivas, negativas, verdaderas, falsas.

Elementos móviles más importantes en exploración geoquímica:

Zn, Ag, U, V, As (bajo todas las condiciones, excepto extrema reducc.)

Elementos notablemente inmóviles

Sn, Nb, Ta, N, Al, Ti, Cr, Th, REE I-5

Perelman (1967) cuantifica la movilidad de cada elemento usando:

K = coeficiente de migración acuosa

$K = 100M/a.N.$

La movilidad de un elemento causa una redistribución o dispersión en forma de halo o aureola alrededor de la mineralización.

Halos primarios: son aquellos formados contemporáneamente con el emplazamiento del cuerpo de mena (singenéticos) I-2

Halos secundarios: son aquellos formados por procesos epigenéticos tardíos

(luego de la formación del depósito) que alteran la distribución de los elementos. En o cerca de la superficie la dispersión secundaria es acusada por:

- _ procesos de meteorización química
- _ procesos de meteorización mecánica

Algunos autores hablan de que: la dispersión secundaria está definida como la redistribución de modelos primarios debido a los procesos ocurridos en la zona de oxidación y meteorización.

Elementos Pathfinder:

Se usan, a parte de los elementos formadores de mena para rastrear el yacimiento. Ejemplo, la dispersión de As en el ambiente de meteorización de depósitos de sulfuros de As, es mucho mayor y más detectable que el Au.

Mo → Cu porfíricos

Se → U

Li → pegmatitas.

(Tabla de elementos pathfinder)

Las características de los elementos están dadas por:

_Propiedades de sus átomos

_Condiciones externas en las que ocurren los procesos dados:

- T°
- P°
- Potencial redox, Eh
- Acidez, pH

Goldshmidt (1945) dividió la tabla periódica en cuatro grupos:

1. Litófilos → Si
2. Calcófilos → S
3. Siderófilos → Fe
4. Atmósfilos → gases I-3

Rastreo de mineralización en base a las asociaciones de elementos I-4

Movilidad: en condiciones de superficie

La movilidad relativa determina a que extensión un elemento puede migrar de mayor a menor concentración.



mineralización → roca de caja, zona de meteorización, agua Subt, atm,

_Movilidad Hipogénica → Litoquímica

_Movilidad Supergénica → por factores como: radio, carga y potencial iónico, y determinar propiedades como: enlaces fuertes, solubilidad, etc.

En condiciones superficiales los diagramas Eh-pH son los más importantes, ya que permiten determinar con cual forma, iónica o mineral un elemento puede ser más estable bajo ciertas condiciones.

Ejemplo el Cu (tabla 2-4, asociaciones de elementos minoritarios y trazas).

Los análisis de los datos geoquímicos pueden tener 2 set de componentes:

1. Com. De Background (de fondo)
2. Com anómalos

Por cada elemento analizado se tiene:

_promedio o valores de background = X

_dispersión alrededor de la X, desvío estandar

Para el calculo de background local y discriminación de valores anómalos.

Método Deptelier (1969)

Valores log normales: intervalos de clase entre 9 y 19 de igual ancho logarítmico.

Se plotean los datos de frecuencia acumulada en papel probabilístico.

Se tiene: _ 1 línea recta = a una población

_ curva en forma de S = a 2 poblaciones

→ X es la media geométrica = litología o valor de fondo de migración

→ $X + 15D = 84\%$

→ $X + 25D = 97,5\% = (\text{arbitrariamente}) \text{ Umbral}$

Técnicas estadísticas

Análisis de un asolo variable (1 elemento) : _ análisis de superficies tendidas

_ promedios móviles

_ cálculo de residuos

Análisis de multivariables (varios elementos):

_ set de datos con cálculos aditivos y multiplicativos

_ análisis de correlación I-2

_ análisis de grupos y correlación

Las anomalías pueden ser:

_ Significativas verdaderas

_ falsas insignificativas.

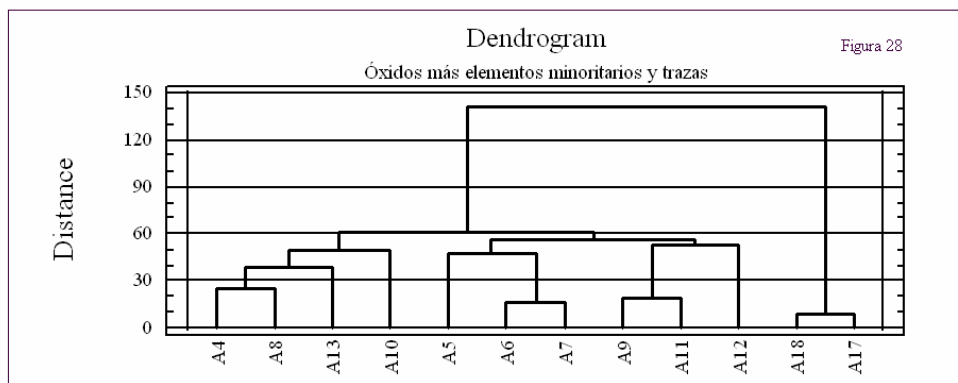
Ciclo geoquímico:

Concentración del elemento: determinada generalmente por su concentración original y por su comportamiento específico durante le transporte del material de un estado a otro, por cristalización, erosión, precipitación, etc.

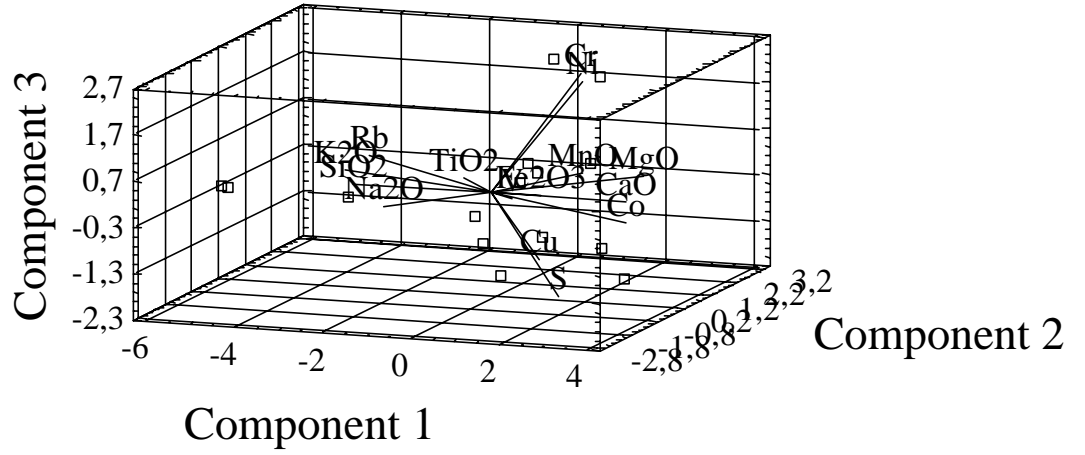
Levinson et. al 1987						
Tipo de Roca	Zn	Pb	Co	Cu	Ni	Ag
Granitos	40	20	1	10	0.5	0.04
Ultramáficas	50	0.1	150	10	2000	0.06
Máficas	100	5	50	100	150	0.1
Corteza Terrestre	70	12.5	35	55	75	0.07

Govett, (1983)						
Tipo de Roca	Zn	Pb	Co	Cu	Ni	Ag
Granitos	60	20	5	20	8	0.05-4.5
Ultramáficas	30	0.1	200	20	2000	0.05-5
Máficas	130	8	45	100	160	0.1-4

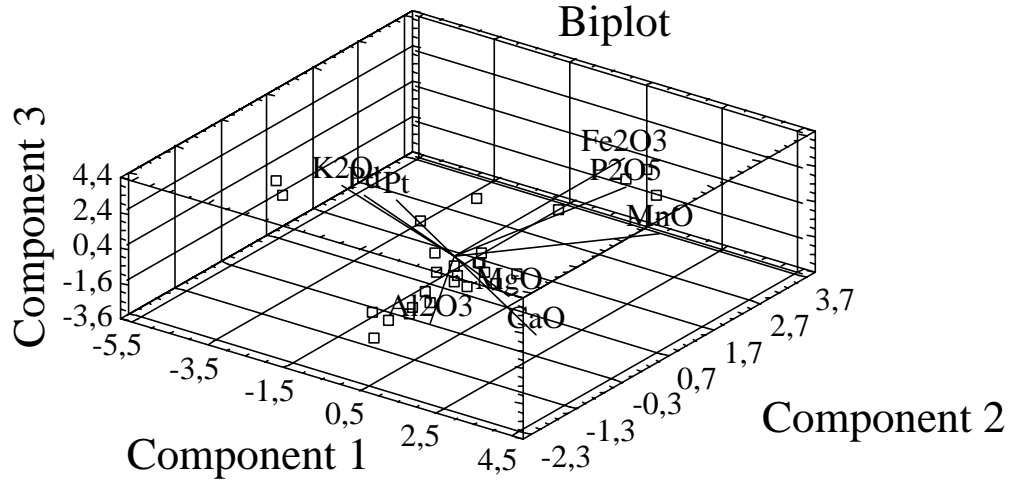
	Cu	Pb	Zn	Qz	Feld.	Plag.	Musc.	Biot.	Circ.	Apat.	Titan.	Epid.	Rut.	Gran.	Turm.	Opac.	Clor.	Ser.
Cu	1,00	-0,44	0,11	-0,67	-0,19	0,28	-0,24	0,51	0,89	0,64	0,29	-0,08	0,41	0,27	0,41	0,52	0,46	0,22
Pb	-0,44	1,00	-0,89	0,23	0,60	-0,08	0,88	-0,97	-0,59	0,22	-0,32	0,27	0,54	-0,28	0,54	0,46	0,51	0,60
Zn	0,11	-0,89	1,00	-0,22	-0,80	0,29	-0,98	0,90	0,21	-0,61	0,40	0,04	-0,85	0,33	-0,85	-0,75	-0,82	-0,88



Biplot



Biplot



Método geoquímico de exploración

Métodos analíticos y sus aplicaciones

El método más común para realizar un estudio de reconocimiento es el análisis de sedimentos de ríos, los métodos comunes para una investigación detallada son el análisis de suelos y el análisis de rocas. En casos especiales se analizan vapor, vegetación y agua.

La tabla siguiente compila los métodos principales (tipos de muestras geoquímicas) de la prospección geoquímica y sus aplicaciones.

Método	Elementos	Aplicación y otros
Espectrometría de absorción atómica	Au, Ag, Hg, Mo, Cu, Pb, Zn, Sn y otros	Método muy común, sobre todo adecuado para el análisis de soluciones acuosas
Colorimetría	As, W, Mo, Ti	
Fluorimetría	U	
Espectrometría de emisión	70 elementos	
ICP = Inductively coupled plasma	50 elementos, por ej. Ba, Mn, B	
RFX = Análisis de fluorescencia de rayos x	Elementos subordinarios menores, óxidos	Adecuado para análisis completos de rocas
Análisis por activación mediante bombardeo neutrónico (NAA)	Au	No destructivo
Microsonda	Varios elementos	Útil para detectar cantidades pequeñas, para determinar la composición de minerales
Espectrómetro de masa	U, Th y otros elementos	
Fire assaying	Au, Ag, Pt	Prueba del fuego

Algunos de los métodos analíticos se basan en la emisión atómica (fotometría de llama, ICP) o en la absorción atómica (espectrometría de absorción atómica). En ambos fenómenos se introducirá brevemente en lo siguiente.

Espectro de emisión: se produce cuando un electrón de un átomo de un elemento pasa de un nivel energético alto (capa lejana con respecto al núcleo del átomo) a un estado energético menor (capa cerca del núcleo atómico). Durante este proceso una cierta cantidad de energía es liberada o emitida en forma de una radiación, que se calcula de la manera siguiente: $E = (h \cdot c) / \lambda$ o $E = (h \cdot c) / \lambda$, donde $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Watt \cdot s = constante de Planck (Plancksches Wirkungsquantum), c = velocidad de la luz en el vacío, λ = longitud de onda. Cada línea espectral caracteriza el salto de un electrón de una capa exterior definida hacia una capa interior definida en el átomo de un elemento definido. Por ejemplo el espectro de emisión de gases incandescentes da a conocer su composición cualitativa.

Espectro de absorción: se produce cuando un electrón de un átomo de un elemento pasa de un estado energético bajo a un estado energético alto consumiendo es decir absorbiendo energía y generando una línea de absorción típica para el cambio del nivel energético y para el elemento, en que lo ocurre.

Espectrometría de absorción atómica

Aparte de la determinación de los componentes principales de una muestra, el método por absorción atómica es especialmente apto para el análisis cuantitativo de trazas de más de 40 elementos metálicos con una precisión de por lo menos 2%. El límite de detección varía entre 0,1 y 1ppm.

Se basa en la producción de un estado excitado de un átomo causada por la absorción de un fotón por el átomo. Cuando luz, que contiene el espectro del elemento específico pasa por una mezcla de gas de átomos no excitados de este elemento específico, las longitudes de ondas características para este elemento son absorbidas parcialmente produciendo de tal modo el espectro de líneas característico para este elemento. Para la mayoría de los elementos el espectro de líneas se ubica en la región ultravioleta y de la luz visible del espectro electromagnético. Como la intensidad de la absorción depende directamente de la cantidad de átomos presentes y capaces de absorber, la extinción de la muestra y la concentración del elemento específico están relacionadas linealmente. A través de calibración se obtiene la concentración del elemento en la muestra.

Las partes más importantes de un espectrómetro de absorción atómica son una fuente luminosa, la unidad de absorción como la llama de acetylen, en que la muestra es atomizada o ionizada, un monocromador normalmente una rejilla, un detector (usualmente un photomultiplier), un amplificador y una unidad para grabar los resultados. La atomización de la muestra también se puede llevar a cabo en un tubo de grafito calentado, lo que para varios elementos mejora el límite de detección.

Espectrometría de emisión

Se basa en la emisión de fotones, que ocurre cuando un electrón en un estado excitado de alta energía regresa a su estado fundamental menos energético. Durante este proceso cada elemento emite un espectro de líneas con longitudes de onda

características siendo en la mayoría de los elementos en el rango de la luz visible. La intensidad de la radiación resultante es proporcional a la concentración del elemento.

Un método de emisión es la fotometría de llama. La transmisión de los electrones de un estado excitado a su estado fundamental se logra calentando la muestra a temperaturas suficientemente altas. La mayoría de los elementos está caracterizada por una temperatura de excitación muy alta, la cual se establece por medio de una llama de gas y oxígeno. Una excepción son los metales alcalinos, cuya temperatura de excitación relativamente baja se produce por una llama de gas y aire. Aplicando la fotometría de llama se puede determinar exactamente las concentraciones de elementos mayores o iguales a 0,02% y alrededor de 40 elementos, principalmente metálicos con concentraciones variándose entre 100ppm y 10%.

ICP = = Inductively Coupled Plasma Analysis

El análisis por plasma generado por inducción de energía de frecuencia del radio es una forma especial de la espectrometría por emisión. La atomización e ionización de la muestra se realiza por la transformación del aerosol de muestra hacia un plasma. El plasma se genera por calentamiento inductivo de un gas (usualmente argón, de vez en cuando nitrógeno) en la bobina de un generador de alta frecuencia. La temperatura de ionización es alrededor de 8000K.

La ventaja del análisis ICP es su límite muy bajo de detección. El método ICP es especialmente apropiado para la determinación de concentraciones pequeñas de elementos difíciles de atomizar como los elementos de las tierras raras (REE), los elementos alcalinotérreos, B, Si, U y Ta. Estos elementos, caracterizados por una afinidad alta respecto a oxígeno, introducidos en una llama de absorción atómica tienden a formar radicales de óxido o de hidróxido, que no se disocian más. A las altas temperaturas de ionización establecidas en el plasma no ocurre esto y se logra la atomización o la ionización de los elementos. Otras ventajas del método ICP son la determinación simultánea de varios elementos y su susceptibilidad baja con respecto a interferencias químicas. Una desventaja es su menor reproducibilidad en comparación con la espectrometría por absorción.

Colorimetría

La colorimetría se basa en la formación de compuestos coloridos en solución debido a la reacción química de un elemento con un reactivo químico específico. Si la intensidad del color es proporcional a la concentración del compuesto, se obtiene una estimación cuantitativa del elemento. La intensidad del color se mide a través de la absorción de luz de un intervalo estrecho de longitudes de onda. Como la mayoría de los reactivos coloríficos reaccionan con varios elementos se debe excluir la interferencia de otros elementos por ejemplo por separación. Comúnmente el complejo colorido es extraído de la solución acuosa y transferido hacia un solvente orgánico de tal manera concentrándolo y separándolo de numerosas interferencias.

Las ventajas de la colorimetría son su sencillez, sus bajos costos y el equipamiento portátil. Además la realización de la colorimetría no exige profesionales de alta experiencia. Las desventajas son la sensibilidad de muchos reactivos respecto a interferencias y respecto a condiciones químicas aberrantes y el hecho, que con un análisis solamente se puede determinar un elemento.

Bibliografía utilizada

GEYH, M.A. & SCHLEICHER, H. (1990): Absolute Age Determination. - p.43 - 47, Springer (Berlin).

Método geoquímico de exploración

Método geobotánico

Hace mucho tiempo se utilizan las asociaciones geobotánicas (y las plantas de color pálido de Agricola) en la prospección geobotánica). Con el desarrollo de normas cuantitativas en la geobotánica se empezaron estudiar las relaciones geoquímicas entre roca, suelo, agua y plantas en detalle. Con este conocimiento la exploración geobotánica formó una parte de 'remote sensing' (fotos infrarrojas, imágenes multiespectrales) Se podría considerar la geobotánica como un aspecto visible de la geoquímica, en que se toman los esquemas especiales del crecimiento de las plantas, la presencia de plantas indicadores y cambios de la morfología o mutaciones de la vegetación como evidencia para anomalías geoquímicas.

La prospección geoquímica utiliza especies de plantas (por ej. un miembro de la familia de las mentas puede indicar la presencia de cobre = Cu), líquenes indicadores y especies de musgos (que indican la presencia de Cu). Además la prospección geoquímica toma en cuenta el aspecto microbiológico, por ejemplo identificando unas especies de bacterias, que es frecuente en suelos encima de depósitos minerales metalíferos.

Algunos distritos mineros de Zambia fueron explorados con base en un miembro de la familia de las mentas, que puede indicar la presencia de Cu.

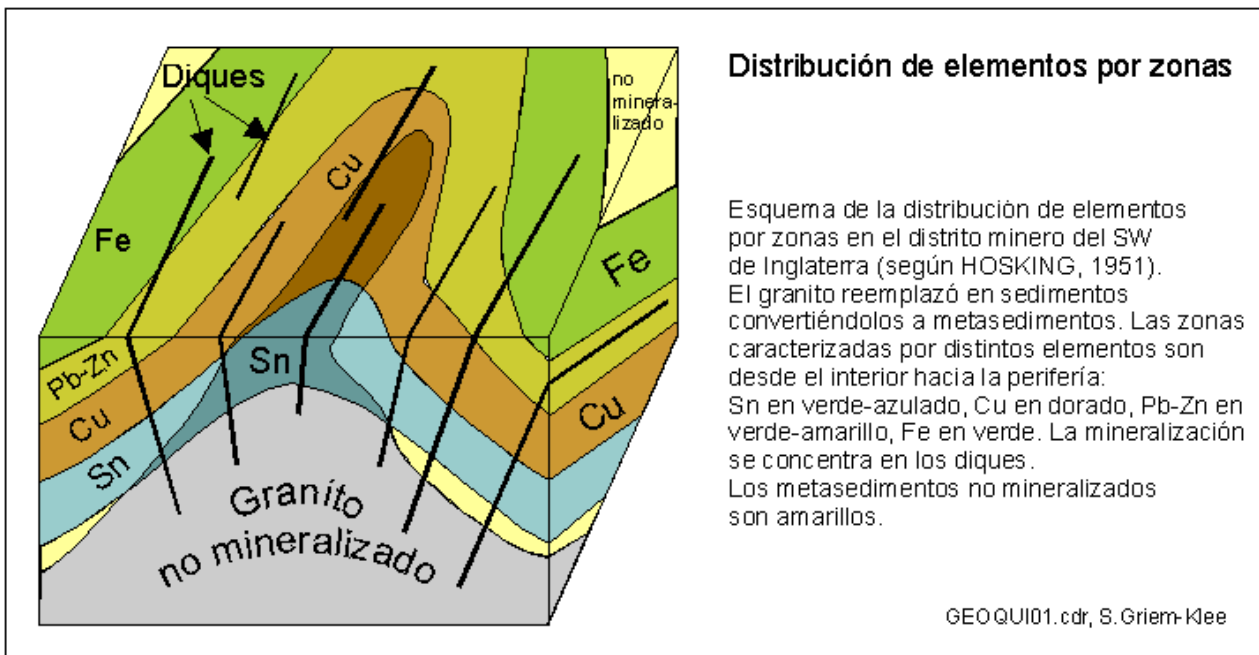
Método geozoológico

La geozoología puede contribuir al reconocimiento de áreas mineralizadas por la observación y el muestreo de mamíferos, aves, peces e insectos. El examen de los granos minerales llevados a la superficie en las bocas de las termitas fue usado en áreas tropicales: el muestreo de termiteros resultó en la detección de concentraciones de metales anómalas y el descubrimiento de por lo menos un depósito de oro en Zimbabwe, la Mina Termita. Otros métodos más experimentales incluyen el muestreo

de miel para análisis de elementos trazas (con el conocimiento de que abejas raramente se alejan de su colmena más de un a dos kilómetros), el muestreo de distintas especies de peces. Un ave de América del Sur prefiere vetas de cuarzo como hábito, por esto se lo llama 'el minero'.

Ejemplos para la aplicación de la geoquímica a la prospección/exploración

1. Distrito minero Cornwall, SW de Inglaterra, distrito de Sn.



El distrito minero Cornwall pertenece a los depósitos minerales epigenéticos hidrotermales vetiformes. La mineralización está relacionada con diques, que se ubican en el contacto granito-metasedimentos (véase fig.). La mineralización se caracteriza por una distribución de los elementos por zonas, que se refleja en la distribución de minerales por zonas (Tabla: Distribución de las zonas de minerales en el distrito minero Cornwall, SW de Inglaterra). La distribución de elementos por zonas desarrollada en los diques es desde el interior (en profundidad relativamente alta) hacia la periferia (cerca de la superficie) la siguiente: zona de Sn (estaño) en el contacto inmediato entre granito y metasedimento - Cu - Pb-Zn - Fe. Los contornos de las zonas enriquecidas en uno o unos distintos elementos son paralelos al contacto entre granito y metasedimentos. Los

diques mineralizados están orientados paralelamente al eje del lomo de granito o es decir que el rumbo de los diques es aproximadamente igual al rumbo del eje del lomo de granito.

Gradientes pequeños de temperatura y presión normalmente establecidos en alta profundidad favorecen la distribución de los elementos por zonas claramente distinguibles. En profundidades someras con gradientes altos de temperatura y presión se observa que las zonas mineralizadas se solapan. A este fenómeno se llama 'telescoping'.

Al principio la minería fue limitada a los niveles de Cu en los diques. En 1839 se descubrieron la distribución de los elementos por zonas. En consecuencia se ampliaron las minas de Cu hacia la profundidad, donde se encontraron Sn. Como entre las zonas de Cu y de Sn puede ubicarse una zona no mineralizada de un espesor hasta 100m no se descubrieron la zona de Sn anteriormente.

Generalmente en el caso de una distribución de los elementos por zonas se continúa buscando hacia la periferia y debajo del depósito mineral para definir la desaparición de la última zona (más exterior).

Este ejemplo demuestra la aplicación de un modelo genético (mineralización por zonas) a la prospección/exploración.

Tabla :

Tipo de ganga	Zona	Tipo de mena	Elementos de valor económico	Profundidad
		Ultima mineralización		Cerca de la superficie
chalc, cc	7	Pirita, hematita, jamesonita de antimonio	Fe, Sb	
flu, chalc	6	Tetraedrita, Pirargirita, siderita, pirita (marcasita)		
cz, flu, dol	5b	Argentita, galenita, esfalerita	Ag, Pb, Zn	
cz, cl, hem, flu, bar	5a	Pechblenda, niquelina, saflorita, cobaltina (bismutina)	U, Ni, Co, Bi	Zonas de diques meso- y epitermales, generalmente perpendiculares a lomos de granitos
cz, cl, hem, flu	4	Calcopirita, esfalerita, wolframita (scheelita), arsenopirita, pirita	Sn, Cu, W, As	
cz, fsp, mc, tur, cl	3	Calcopirita (estannita), wolframita (scheelita),	Sn, Cu, W, As	

		arsenopirita, casiterita		
cz, fsp, mc, tur	2	Wolframita (scheelita), arsenopirita, molibdenita?, casiterita	Sn, Cu., W, As	
cz, fsp, mc, tur	1	Casiterita, especularita	Sn, W, As	Zonas de diques hipotermales, a menudo paralelas a lomos y diques de granitos, alta profundidad
cz, fsp, mc, tur	ii	Arsenopirita, estannita, wolframita, casiterita, molibdenita	Sn, W, As	Diques frecuentes en el techo de los granitos
cz, tur	i	Arsenopirita, wolframita, casiterita, molibdenita	Sn, W, As	
		Primera mineralización		

i : pegmatitas

ii : diques rodeados por 'Greisen' (= formado por alteración metasomática)

Abreviatura: cz = cuarzo, fsp = feldespato, mc = mica, tur = turmalina, cl = clorita, hem = hematita, flu = fluorita, chalc = calcedonia, bar = baritina, dol = dolomita, cc = calcita

Composición de las menas:

Arsenopirita FeAsS , Wolframita $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$, Scheelita CaWO_4 , Casiterita SnO_2 , Molibdenita MoS_2 , Estannita $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$, Especularita Fe_3O_4 , Calcopirita CuFeS_2 , Pechblenda UO_2 , Niquelina NiAs , Saflorita CoAs_2 , Cobaltina CoAsS , Bismutina, Argentina Ag_2S , Galenita PbS , Tetraedrita $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, Pirargirita, Siderita FeCO_3 , Pirita FeS_2 (cúbico), Marcasita FeS_2 (ortorómbico), Hematita Fe_2O_3 , Jamesonita $\text{Pb}_4\text{Fe}^* \text{Sb}_6\text{S}_{14}$ ($=4\text{PbSFeS}^* 3\text{Sb}_2\text{S}_3$).

Epitermal: Cerca de la superficie hasta 1500m, temperatura entre 50 - 200°C, en rocas sedimentarias y rocas magmáticas, diques, stockwork.

Mesotermal : Profundidad entre 1200 - 4500m, temperatura entre 200 - 300°C, adentro o cerca de intrusiones magmáticas, depósitos formados por substitución o como rellenos de diques, transiciones de menas macizas a stockwork.

Hipotermal: Profundidad entre 3000 - 15000m, temperatura entre 300 - 600°C, adentro o cerca de cuerpos plutónicos profundos, rellenos de vetas o substituciones, acompañados por impregnaciones, por ejemplo Sn en Cornwall.

2. Flat-River, Old Led Belt, SW de Missouri/EEUU

Distribución de los elementos Pb, Zn, Cu, Ag y Cd por zonas. Adentro de la zona de Pb, que tiene la mayor extensión, se ubica la zona de Zn con contornos parecidos a los contornos de la zona de Pb. Las zonas de Cu y de Ag y Cd forman manchas pequeñas en la zona de Pb. Las zonas de Ag y Cd están relacionadas con las fallas, dos de estas zonas se ubican en la intersección de dos fallas.

Por consiguiente en este caso las intersecciones de fallas son prometedoras para la búsqueda de las menas.

3. Depósito de Sn de Altenberg, Erzgebirge, en el este de Alemania

Fig. en preparación

‘Greisen’ son agregados granoblásticos de cuarzo y muscovita (o lepidolita) con contenidos accesorios de topacio, turmalina y fluorita y con contenidos de Sn y W, que se forman por alteración metasomática. Se ubican a menudo en los contactos superiores de intrusiones de granitos y a veces son acompañados por mineralizaciones del tipo ‘Stockwork’.

El depósito de Sn de Altenberg es un depósito del tipo Stockwork. Se constituye de veins (diques) de casiterita, wolframita y molibdenita, que pasan por un cuerpo de ‘Greisen’, formados por alteración metasomática, que afecta los granitos.

En distancias relativamente altas del depósito (800m) se encontraron concentraciones anómalas altas de Sn (línea segmentada) y Bi (línea punteada). Contenidos elevados en Mo (línea segmentada punteada) se ubican en una zona más cerca al depósito (500m). La zona de Ga (gallium, línea segmentada y punteada) es relativamente profunda y angosta. Concentraciones elevadas de Li se ubican debajo del depósito en relativamente alta profundidad.

En el depósito de Altenberg los elementos Ga y Li se ubican en el centro y en profundidad relativamente alta, los elementos Sn-Bi-Mo se ubican en la periferia y en un nivel más somero. De esto se puede deducir que los elementos Ga y Li fueron enriquecidos en la primera fase de mineralización y que los demás elementos como Sn-Bi-Mo fueron concentrados en una fase tardía de mineralización.

La secuencia paragenética para la región del Erzgebirge es F-Ga-Li-Sn-As-Bi-Mo.

Además en la región del Erzgebirge se utilizaron la distribución de los elementos por zonas en minerales de wolframita para la búsqueda de depósitos de Sn. La proporción de Fe-Mn en wolframita se aumenta en zonas de W y Sn de los ‘Greisen’ caracterizados por altas temperaturas de formación. Con base en esta observación se delinearon la proporción huebnerita/ferberita ($MnWO_4/FeWO_4$) a lo largo de un perfil

por un dique pequeño de wolframio (W) para encontrar los valores más altos. En la exploración siguiente se proyectaron este punto hacia la profundidad y encontraron un depósito de Sn en una profundidad de 300m.

En la prospección/exploración de depósitos parecidos los elementos Sn y Bi podrían indicar la presencia de un depósito en distancias relativamente grandes (target rings), el elemento Mo podría indicar la proximidad al depósito, el elemento Ga podría indicar las raíces del depósito.

4. Relación entre la geología de un área y la distribución de Ni en suelos residuales en la región Nguge, Tansania

Los valores más elevados de Ni (mayor a 500ppm y mayor a 1000ppm) detectados en los suelos residuales ocurren en los sectores formados por la picrita. En estos sectores en la cercanía e inmediatamente en los ríos los valores de Ni bajan obviamente debido a que los ríos diluyen y transportan una cierta cantidad de los elementos enriquecidos en los suelos residuales.

Picrita es una roca volcánica ultramáfica, se constituye principalmente de olivino en su mayoría transformado en serpentina y de augita, el piroxeno de la composición enstatita-bronzita es más raro, la hornblenda de formación primaria ocurre solo subsidiariamente, la biotita participa esporádicamente, accesorios son apatita, magnetita y el espinel de cromo. En el olivino una cierta cantidad de Mg puede ser reemplazado por Ni. A partir del olivino puede formarse por meteorización una serpentina rica en Ni (garnierita $(Ni, Mg)_3[(OH)_4/Si_2O_5]$). Los valores elevados de Ni se deben a un olivino rico en Ni, que puede ser transformado a la serpentina rica en Ni. La norita de olivino es una roca plutónica ultramáfica de piroxeno, plagioclasa y olivino. La anortosita es una roca plutónica leucocrática de plagioclasa como componente principal, que ocurre geológicamente junto con gabro o charnockita.

La distribución de Ni en los suelos residuales encima de las rocas refleja la litología del subsuelo.