

7. Mineralogénesis

Los minerales son los productos de los procesos físico-químicos naturales y los componentes de las rocas y diferentes yacimientos. Los procesos geológicos debido a los cuales se forman los minerales, se dividen por la fuente de energía, en los dos grandes grupos siguientes: endógenos (de origen interno), ligados con la energía interior de la Tierra y formados en los procesos que transcurren a cuenta de la energía térmica interna del globo terrestre y exógenos (de origen externo) ligados con la acción de la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera sobre la litosfera bajo la influencia de la energía del sol.

Los procesos endógenos se producen en las entrañas de la Tierra y son vinculados con la actividad magmática o las transformaciones metasomáticas de las rocas. Los procesos endógenos transcurren a la temperatura y presiones altas. La temperatura de cristalización de las rocas magmáticas, en función de la composición de la masa fundida oscila entre 1200 y 700°C y la presión aproximadamente entre 5500 y 500 kilobars. La formación de las pegmatitas y las rocas postmagmáticas (metasomáticas) - los skarns y los greisens, los filones minerales hidrotermales, etc. - enlazada con el proceso magmático se produce a unos valores de T y P considerablemente menores.

Los procesos exógenos se producen en la superficie o cerca de la superficie terrestre así como en la atmósfera y la hidrosfera. Dichos procesos se manifiestan en la destrucción física y química de las rocas, las menas y los minerales y la formación de los minerales estables en condiciones de superficie terrestre. A éstos pertenecen también los procesos biógenos de mineralogénesis que son vinculados con la actividad de organismos. Los procesos exógenos son bastante variados. Entre ellos cabe señalar los dos más importantes: los procesos de meteorización y los procesos de sedimentación.

Los minerales y las rocas que han surgido debido a los procesos endógenos y exógenos, sufren transformaciones llamadas metamorfismo al variar las condiciones termodinámicas y físico-químicas. En este caso nacen nuevos minerales y rocas denominados metamórficos.

A. Magmáticos

Se originan a partir de un magma o masa rocosa fundida de composición compleja, constituida por numerosos elementos (Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, K, O, H, etc.) y componentes volátiles (principalmente vapor de agua y otros gases). A gran profundidad, por alta presión y temperatura, el magma es fluido, pero al ascender tiende a enfriarse y cristalizar. Si las cristalizaciones se producen en el interior de la tierra son graduales, selectivas y siguen un cierto orden, pero si sale al exterior se enfría rápidamente y se forman vidrios volcánicos. Se distinguen las siguientes fases del proceso magmático:

1. Fase Ortomagmática. Va desde las elevadas temperaturas iniciales hasta más cercanas a los 1000°C. Primero cristalizan los minerales de alto punto de fusión: olivino, piroxenos (enstatita) y minerales accesorios (diamante, circón, apatito, pirotina, etc.) después los anfíboles con algo de Ca (augita y hornblenda) y la biotita. Seguidamente las plagioclasas, luego la ortosa y, por último, el cuarzo. En esta etapa, las sustancias volátiles tienen poca influencia porque su cantidad relativa es escasa, pero se concentran y actúan en etapas posteriores.

Como resultado del enfriamiento del magma sucede la cristalización de los minerales de la masa fundida magmática. La variedad de las rocas se explica por los procesos de diferenciación y licuación del magma, la asimilación de las rocas encajanantes y depende de las condiciones geológicas de formación de las rocas ígneas (Tabla 7.1).

Grupo	Intrusivas (plutónicas)	Efusivas (extrusivas)		Minerales principales		Minerales secundarios
		poco modificadas	modificadas mucho	principales	secundarios y accesorios	
I. Ultrabásicas	dunita peridotita piroxenita	—	—	olivino (100 ... 85%), piroxeno (0 ... 15%), olivino (70 ... 30%), piroxeno (30 ... 70%), olivino (10%), piroxeno (100 ... 90%)	magnetita, ilmenita, cromita, espinela, pirrotita (1 ... 3%)	serpentina, uralita, talc clorita,
II. Básicas	gabro	basalto	diabasa (o porfirita basáltica)	plagioclasas básicas (50 ... 70%), piroxenos (25 ... 50%), más raramente olivino (5 ... 10%), hornblenda y biotita	ortoclasa, cuarzo, apatita, magnetita, titanita, ilmenita, pirrotita, pentlandita (1 ... 6%)	albita, clor uralita, tal sericita
III. Medias a) con plagioclasas	diorita	andesita	porfirita (porfirita andesítica)	plagioclasas medias (50 70%), hornblenda (10 20%), más raramente biotita (10 ... 15%), piroxenos	cuarzo (0 ... 15%), feldespato potásico (0 ... 6%), apatita, titanita, magnetita (1 ... 2%)	sericita, coalinita, zoisita, clorita, carbonatos
	b) con feldespatos potásicos	sienita	traquita	ortófiro feldespato potásico (50 70%), plagioclaseo (10 ... 30%), hornblenda, más raramente biotita (10 ... 20%)	cuarzo (0 ... 5%), citrón, titanita, apatita, magnetita (1 ... 2%)	sericita, caolinita, clorita
IV. Ácidas	granito	liparita	pórfido cuarzoso	cuarzo (25 ... 35%), feldespato potásico (35 40%), plagioclaseo (15 ... 25%), biotita (5 15%), más raramente moscovita (0 ... 3%), hornblenda	apatita, citrón, magnetita, turmalina (1 ... 2%)	sericita, caolinita, clorita
V. Alcalinas	sienita nefelínica	—	—	feldespato potásico (55 65%), nefelina (15 ... 30%), piroxenos y anfíboles alcalinos (10 ... 25%), más raramente la biotita	citrón, titanita, apatita, magnetita (~ 2%)	sericita, caolinita, clorita, zeolitas

Tabla 7.1. Clasificación de las rocas magmáticas y sus asociaciones minerales principales.

En la Figura 7.1 se muestran los tres casos diferentes de cristalización de los minerales silíceos y metalíferos a partir de los magmas ultrabásico y básico, lo que conduce a los tres tipos de yacimientos magmáticos. Se denominan respectivamente magmáticos se cristalizan antes o simultáneamente con los silicatos (I-er caso), de licuación, cuando la separación de la masa fundida metalífera de la silícea sucede todavía en la fase líquida (II-o caso), y magmáticos tardíos, cuando la masa fundida metalífera se separa de la silícea y la cristalización de los minerales metalíferos sucede mas tarde que los silicatos, los minerales metalíferos como si cementaran los silicatos llenando las grietas (III-er caso). Los principales yacimientos de Fe y Ti (titanomagnetitas) por su origen son los yacimientos magmáticos tardíos.

Los yacimientos minerales de origen magmático solo se encuentran en las rocas intrusivas ultrabásicas y básicas. A esta categoría pertenecen los yacimientos de Cr, Pt y otros metales del grupo del platino, así como los yacimientos de C, Ni, Co, Fe, Ti etc.

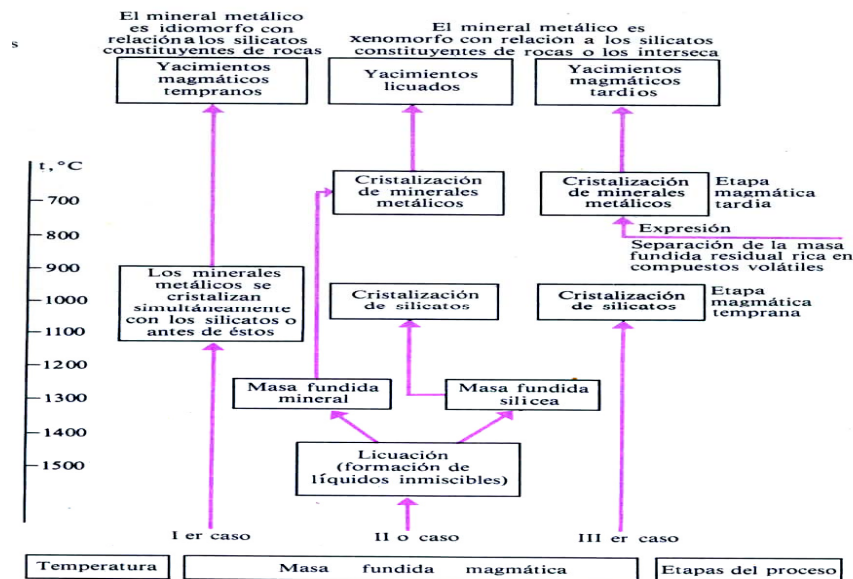


Figura 7.1. Esquema de separación de los componentes minerales en el magma y formación de diferentes tipos de yacimientos magmáticos

2. Fase Pegmatítica. El residuo que queda del periodo anterior es rico en ciertos elementos (Be, Li, B, U, etc.) ya que tienen radios iónicos muy grandes o muy pequeños y no pudieron entrar en las redes de los minerales que se formaron. Lleva abundantes gases, por lo que penetra y cristaliza en fisuras y cavidades originando cristales, a veces muy grandes y bien conformados. La temperatura está comprendida entre los 1000°C y los 600°C. Minerales típicos de este período son: el berilo (aguamarina), turmalina y espodumena (Fig. 7.2). Para las pegmatitas graníticas fueron separados 10 tipos que caracterizan consecutivamente el proceso de pegmatitogénesis (Tabla 7.2). Las pegmatitas se forman en las capas extremas superiores de los macizos magmáticos y solo cuando estos macizos se forman a grandes profundidades en condiciones de alta presión exterior. Ellas son los cuerpos filonianos de grano grueso y gigantesco, cuya composición es próxima a aquellas intrusiones, con las cuales son enlazadas espacialmente y de

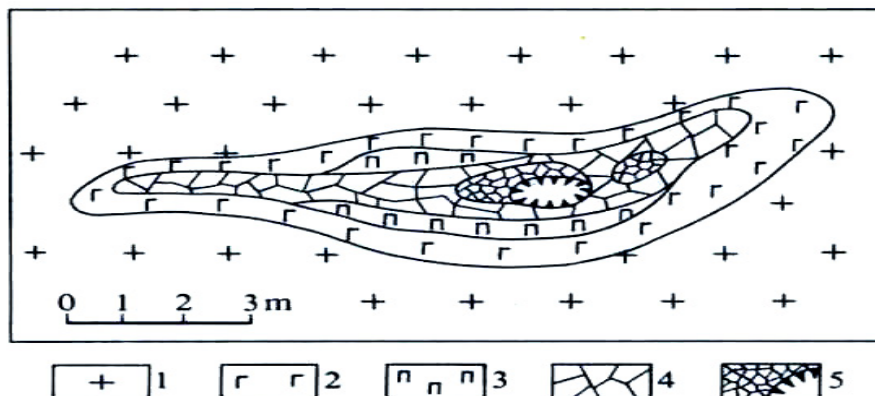


Figura 7.2. Veta pegmatítica en el granito: 1-granito, 2-pegmatita de estructura gráfica, 3- pegmatita de estructura pegmatóide (bloques de Q y KFSP), 4-zona monomineral de feldespato, 5-núcleo de cuarzo (con cristales de berilo y topacio en cámara).

Etapas	Magmática		Epimagmática		Neumatolítica				Hidrotermal			Hipergena
Geofases	magmática		epimagmática	pegmatítica	pegmatoides		sobrecríticas		hidrotermales			hipergena
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	
Temperatura, °C	900	800	700	600	575	500	400	375	50	0		
Procesos		prepegmatítico de la masa fundida				pegmatítico de la solución fluida		postpegmatítico de la solución hidrotermal				hipergeno
Método de cristalización												
Característica de las geofases	solidificación del macizo granítico	formación de las aplitas y los ribetes de contacto		pegmatita de estructura gráfica	etapa principal de feldespatos, cuarzo, moscovita, scherlo, berilo, topasio	pegmatitagénesis son característicos los procesos de sustitución: moscovitización, albitización, formación de minerales de litio y otros metales raros			micas verdes, fluorita, carbonatos, sulfuros, zeolitas			minerales hipergenos
Tipos de pegmatitas			I, II	III, IV	V, VI, VII	VIII, IX, X						

Tabla 7.2. Esquema del proceso pegmatítico según A. Fersman.

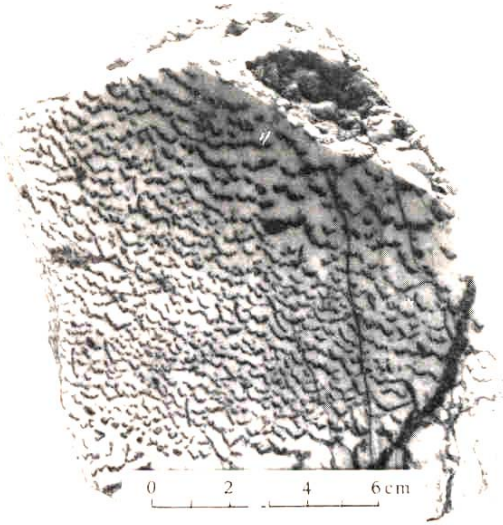


Figura 7.3. Pegmatita con textura gráfica de cuarzo y feldespato (Karelia, Rusia).

las cuales difieren por la forma, la textura (Fig.7.3) y la presencia de minerales económicos. El numero aplastante de pegmatitas esta enlazado con granitos (pegmatitas graniticos), mas raramente se encuentran pegmatitas enlazados con las rocas de otro tipo (Tabla 7.2.). Entre las pegmatitas graniticas se separan las cerámicas (grandes bloques de microclina y cuarzo), micaceas (moscovita), de metales raros (Li, Cs, Be, Ta-Nb) y piedras preciosas (cristal de roca, topacio, berilo).

3. Fase Pneumatolítica. Después de la fase anterior, quedan muchos más gases, que tienden a ascender y escapar utilizando fracturas y reaccionando con los minerales existentes para dar otros nuevos (Fig. 7.4). La temperatura va desde unos 600°C hasta aproximadamente los 400°C. Minerales típicos de este período son: topacio, granates, escapolita, etc.

Si el magma está próximo a la superficie se pueden escapar los gases formando fumarolas, depositándose minerales por sublimación como el azufre.

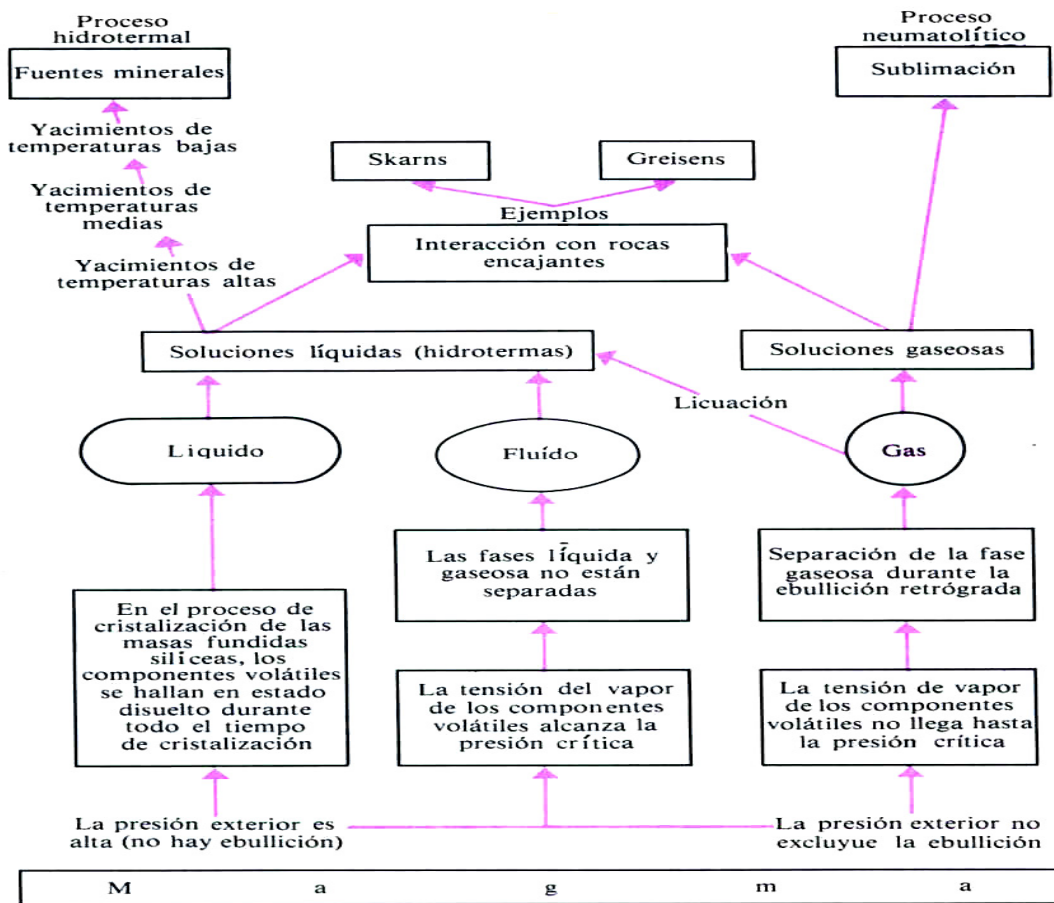


Figura 7.4. Esquema de separación de las soluciones gaseosas y líquidas del magma y su relación con procesos postmagmáticos.

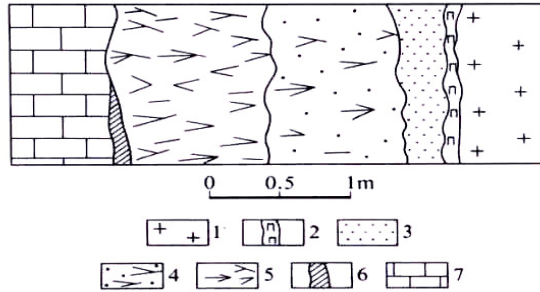


Figura 7.5. Zonalidad de los skarns en uno de los yacimientos de Asia Central: 1, granito, 2, roca de piroxeno-plagioclasa de grano fino; 3, skarn de piroxeno-granate de grano medio y grueso; 5, skarn de hedenbergita (piroxeno); 6, veta de wolastonita, 7, caliza marmórea.

Los skarns (Fig.7.5) son las rocas metasomáticas constituidas por silicatos calcáreos-ferruginosos (granates, piroxenos, epidoto) que se han formado debido a la interacción de reacciona entre las rocas carbonatadas y alumosilíceas con participación de soluciones postmáticas. Los skarns son muy importantes de yacimientos de minerales útiles metálicas (magnetita, galena, esfalerita, calcopirita, casiterita etc.-
Tabla 7.3. Minerales de los skarns calcáreos).

Principales	Secundarios	Minerales con el valor económico
Grosularia-Andradita Diopsida-Hedenbergita Vesuviana Epidota Escapolita Magnetita Wolastonita Cuarzo	Plagioclasas Tremolita Scheelita Molibdenita Datolita Danburita Axinita Ilvaita Fluorita Casiterita Pirita Calcopirita Cobaltita Galena Esfalerita Oro Safiorita Esmaltina	Magnetita Scheelita Molibdenita Cobaltita Galena Esfalerita Esmaltina Safiorita Danburita Datolita Calcopirita Oro Casiterita

4. Fase Hidrotermal. Por debajo de unos 400°C hasta temperaturas ambientales. Se produce a partir de soluciones acuosas ascendentes, calientes, sin gases que depositan

minerales en las fracturas formando filones y vetas (Fig.7.4., 7.6) o impregnando rocas porosas. Cristalizan en este período los sulfuros: escalerita, pirita, galena, cinabrio y también fluorita, barita, etc.



Figura 7.6. Molibdenita MoS_2 en zalbandas (zonas periféricas) de una veta de cuarzo.

Las soluciones hidrotermales son las soluciones acuosas calientes que se separan de la magma o se forman debido a la licuación de los gases. Como las hidrotermales suelen avanzar por las grietas, la forma de la mayoría de los cuerpos minerales hidrotermales es filoniana. Las minerales filonianos mas importantes son cuarzo, calcita (y otros Carbonatos), barita, fluorita. En la mayoría de los casos, los filones están representados por masas de cuarzo que comprenden aglomeraciones de diferentes minerales, los más de las veces Sulfuros metálicos. De los yacimientos hidrotermales se extraen las mayores cantidades de los minerales de metales raros (W, Mo, Sn, Bi, Sb, As), no ferrosos (Cu, Pb, Zn), nobles (Au, Ag), radiactivas (U, Ra, Th) - ver tablas 7.3.-

7.5.

B. Sedimentarios.

Las rocas sufren ataque o erosión por agentes físicos (agua, hielo, aire, insolación) o químicos (oxidación, hidrólisis, hidratación) disgregándose y quedando en libertad los minerales más resistentes que pueden depositarse por gravedad en el mismo lugar donde se liberaron, dando lugar a yacimientos eluviales o residuales o ser arrastrados y depositarse en lugares lejanos originando yacimientos aluviales, transportados o placeres.

Muchos elementos quedan disueltos en el agua y se pueden depositar: por acción química, al formarse un compuesto insoluble, como las calizas, dando lugar a los depósitos de tipo químico; por la acción de microorganismos, como el azufre o el hierro, originando los depósitos de tipo bioquímico; por evaporación de la solución, como la halita, en los yacimientos evaporíticos; por concentración de geles como el ópalo; o alterando la parte superior de otros yacimientos, formando la montera, donde se originan nuevos minerales, como sucede en el caso de la malaquita, smitsonita, turquesa.

Toda la variedad de los procesos exógenos puede reducirse a la meteorización de rocas y menas y la sedimentación, los procesos muy entrelazados (Fig.7.7). La meteorización es el conjunto de procesos que conducen a la destrucción mecánica y la descomposición química de rocas y minerales no estables en condiciones de superficie terrestre. Al dominar unos u otros agentes de meteorización esta suele dividirse en mecánica (desintegración), química (oxidación,

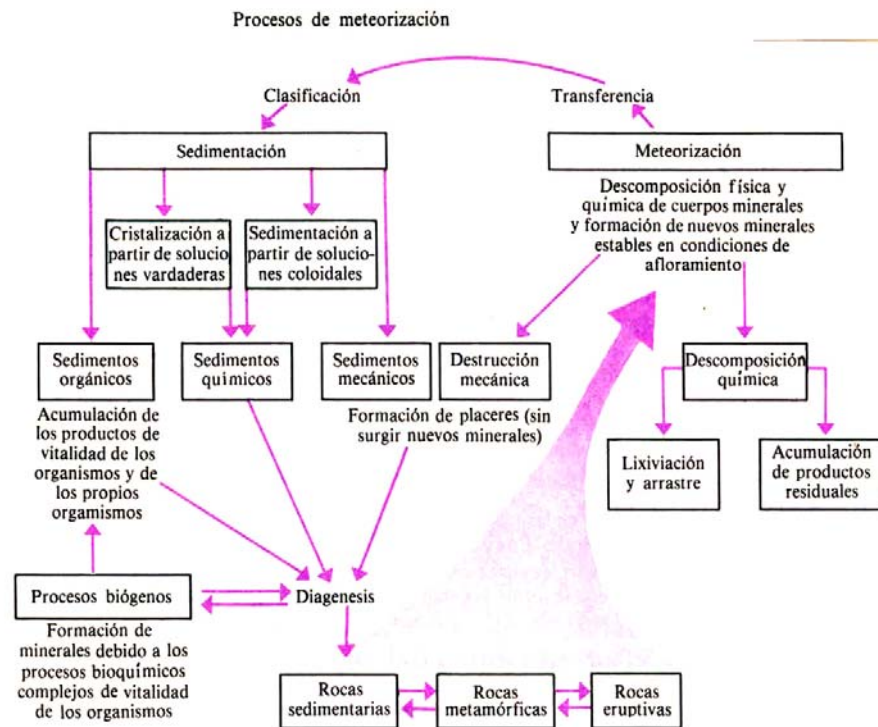


Figura 7.7. Esquema de los procesos exógenos.

hidrólisis, hidratación etc.) y bioquímica (toman parte las plantas y los organismos vivos). Durante la destrucción mecánica de rocas y menas no se forman nuevos minerales, sin embargo debido a la trituración de las rocas, la transferencia del material detrítico por las corrientes de agua y su sedimentación siguiente surgen diferentes rocas detríticas y placeres de varios minerales preciosos (oro, platino, casiterita, diamantes, zircón etc.). En el proceso de la sedimentación se observa la diferenciación mecánica y química (Fig.7.7.). En el último caso se forman las menas sedimentarias de hierro y manganeso.

Las rocas químicas se forman a partir de los sedimentos químicos de las diferentes soluciones. La precipitación de las soluciones depende principalmente de la

concentración de las sales disueltas y las temperaturas de la solución. A las rocas químicas se atribuyen los cloruros, ciertas calizas, dolomitas, sulfatos.

Las rocas organógenas consisten del material calcáreo, silicio, de carbono. Ellas se forman gracias a la vitalidad de los organismos. Los productos de meteorización poco solubles se quedan en el lugar de destrucción de las rocas y menas o se trasladan insignificativamente. Así se forman las cortezas de meteorización, que en forma de capas cubren a veces grandes áreas. Las condiciones físico-químicas de formación de las cortezas de meteorización, sus fases, la zonalidad, las migraciones de elementos son muy diferentes y dependen de varios factores. Se diferencian unos cuantos tipos de cortezas de meteorización, entre los cuales son muy importantes las lateritas (menas de Ni) y las bauxitas (menas de Al).

Las cortezas de meteorización peculiares que surgen en los yacimientos metálicos (sobre todo Sulfuros) se llaman las zonas de oxidación o "sombreros de hierro". Estas zonas obtuvieron tal nombre gracias a las mezclas de los Hidróxidos de Fe (limonitas), que se concentran en la parte superior oxidada del yacimiento. Los "sombreros de hierro" tienen gran importancia durante la exploración indicando en la presencia a cierta profundidad de un yacimiento sulfuroso (ricas menas de Cu).

C. Metamórficos.

Son yacimientos originados por variaciones químicas y estructurales de las rocas, ocasionadas por cambios de presión y temperatura. Los principales tipos de metamorfismo son:

De Contacto. Cuando masas magmáticas ascendentes y calientes, encajan en otras rocas y las transforman parcialmente, dando lugar a minerales nuevos. En este proceso actúa básicamente la temperatura y se producen alteraciones similares a las de la fase hidrotermal y pneumatolítica.

Si la roca encajanante es una cuarcita solamente recrystaliza. Si es una dolomita se producen silicatos cálcicos (grosulario, diópsido, vesiviana, diopsido, zeolitas y otros como scheelita y magnetita. Si se trata de rocas esquistosas se producen almandino, espinelas y corindón.

Regional. Afecta a enormes volúmenes de rocas y tienen lugar en las grandes cuencas sedimentarias (bordes de convergencia de placas), por aumentos de presión y temperatura.

En la actualidad se admiten las siguientes divisiones de este metamorfismo:

- Muy bajo grado. Orienta los sedimentos y produce algunas transformaciones mineralógicas.
- Bajo grado. Aparecen texturas pizarrosas y nuevos minerales como zoisita y pirofilita.
- Grado medio. Produce textura de esquistos y da minerales muy típicos del metamorfismo como andalucita, distena, estaurolita, etc.
- Alto grado. Se pierde la estructura esquistosa. Pueden aparecer rocas como el gneis y minerales formados a gran presión y temperatura.

Tanto las rocas endógenas como exógenas, una vez constituidas experimentan distintas transformaciones (metamorfismo) cuando cambian las condiciones externas de su existencia. Las rocas ígneas y sedimentarias puedan someterse, merced a los movimientos tectónicos de la corteza terrestre, a la acción de alta temperatura, de gran presión y de soluciones gaseosas y acuosas las cuales en su combinación determinada forman diferentes facies metamórficas (Fig. 7.8). Por el carácter regional de estos fenómenos las rocas se transforman en las metamórficas (gneises, esquistas, anfíbolitas, etc.). El metamorfismo local con las soluciones gaseosas y acuosas es una causa de la

formación de los greisens y los skarns. Los greisens son las rocas metasomáticas formadas debido a la transformación por soluciones gaseosa y acuosas postmagmáticas, principalmente granitos. Estas rocas son esencialmente cuarzosas-moscovíticas con las menas de Mo, Bi, W (molibdenita, bismutinita, wolframita) y algunas piedras preciosas (berilo, topacio, turmalina).

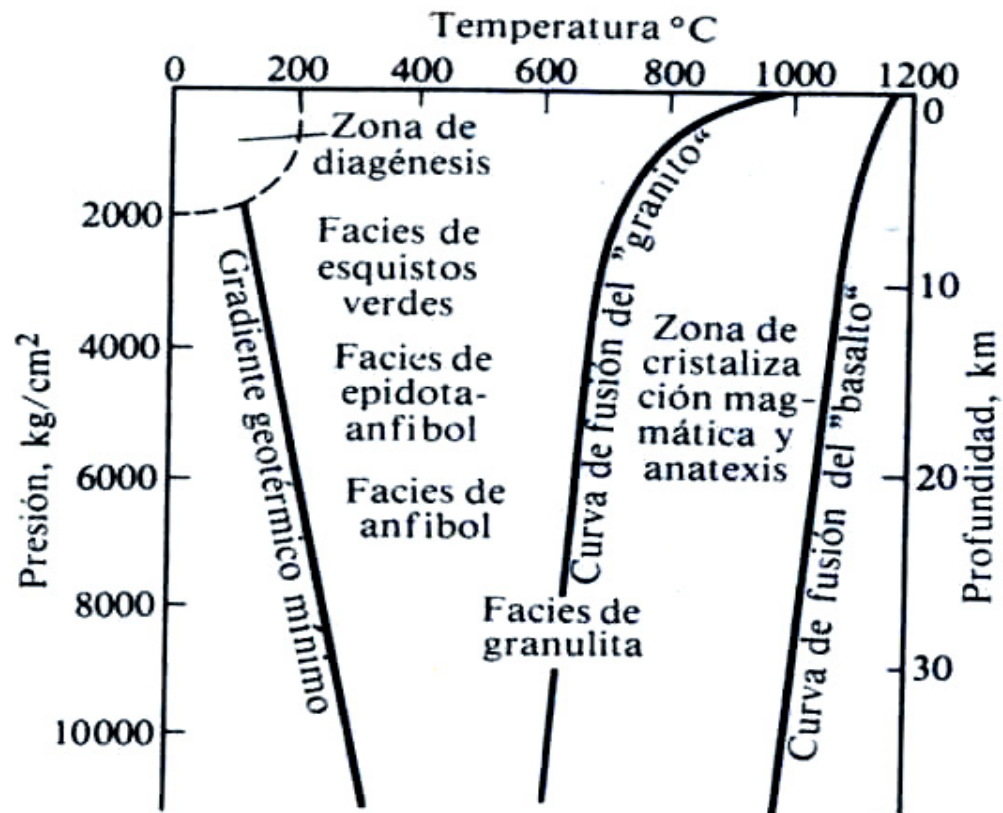


Figura 7.8. Facies principales metamórficas en función de la temperatura y la presión.

D. Yacimientos Minerales. Los yacimientos minerales se formaron a distintos niveles de la superficie lo cual dejó su huella en las condiciones geológicas y físico-químicas de su formación. Pueden separarse cuatro zonas profundas de formación de yacimientos minerales: ultraabisal, abisal, hipabisal y superficial (Fig. 7.9).

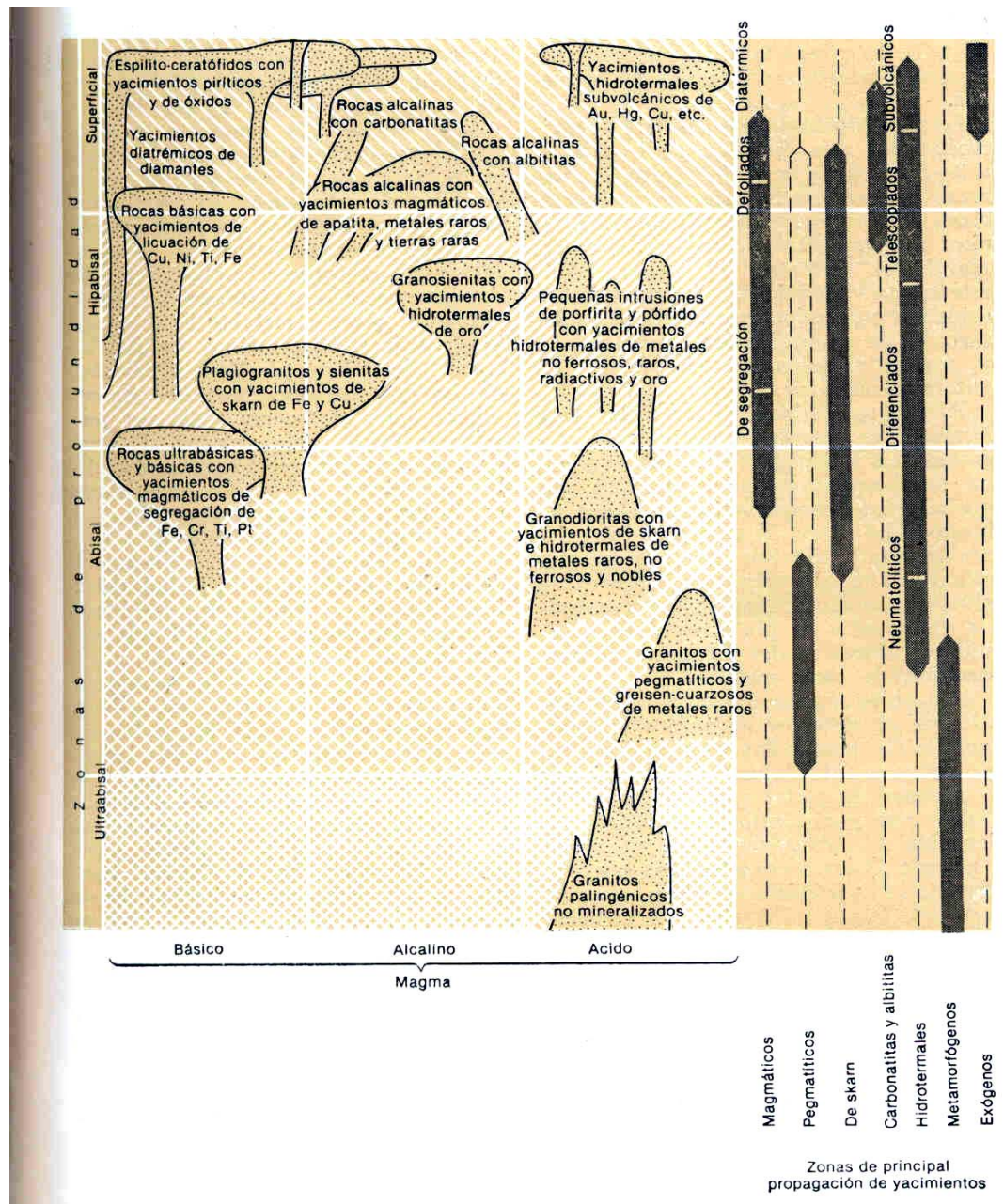


Figura 7.9. Esquema de ubicación de las formaciones de rocas intrusivas y efusivas y grupos genéticos de los yacimientos minerales según las zonas de profundidad.

La zona ultraabisal se extingue aproximadamente desde el límite de Mohorovicic hacia arriba hasta 10-15 km al superficie terrestre. Para la zona ultraabisal,

conocida por complejos de rocas metamórficas profundas de precámbrico (más de ~600 m.a.), es característico un desarrollo de granitoides palingénicos sin una mineralización económica. Para esta zona son conocidos yacimientos relativamente raros de origen metamórfico (distena, adalusita, silimanita, rutilo, cvorindón, grafito y flogopita).

La zona abisal se encuentra situada aproximadamente a la distancia de 3-5 km a 10-15 km de la superficie terrestre. Para la zona abisal los más típicos son los granitos con los cuales están asociados los yacimientos pegmatíticos, albitíticos y de cuarzo-greisen de metales raros. A la parte superior de la zona abisal que es el sector de paso a la zona hipabisal suprayacente están asociados dos fromaciones de rocas intrusitas: 1) las rocas ultrabásicas y básicas que contienen yacimientos magmáticos de segregación de cromo, titanomagnetita y platinoides; 2) los granitoides moderadamente ácidos que contienen yacimientos de skarn e hidrotermales de minerales raros y no ferrosos (Fe y Cu) y de oro.

La zona hipabisal se encuentra aproximadamente a la distancia de 1-1.5 km a 3-5 km de la superficie terrestre. Para esta zona son más típicas tres formaciones de rocas intrusivas: 1) plagiogranitos y sienitas con los yacimientos de skarn de hierro y de cobre; 2) pequeños intrusivos con yacimientso hidrotermales de metales no ferrosos, raros, radioactivos y oro de altas temperaturas; 3) granosienitas con yacimientos hidrotermales de oro de mediana temperatura. En la parte superior de la zona hipabisal, que es el sector de paso a la zona superficial, se encuentran dos formaciones más: 1) las rocas básicas con yacimientos magmáticos de licuación de menas de sulfuro de cobre y níquel; 2) las rocas alcalinas con yacimientos magmáticos de apatita, metales raros y tierras raras.

La zona superficial se distingue por el desarrollo de las rocas efusivas e intrusivas y los yacimientos asociados a éstas. Se extiende desde la superficie de la

tierra hasta la profundidad de 1-1.5 km. Dentro de sus límites se destacan 4 principales formaciones de rocas magmáticas: 1) espilito-ceratófidos con yacimientos piríticos y de óxidos de metales ferrosos, no ferrosos y de manganeso; 2) cuerpos efusivos básicos y ácidos con yacimientos subvólcanicos hidrotermales de baja temperatura con concentraciones de oro, plata, estaño, mercurio, cobre y otros metales; 3) chimeneas kimberlíticas diamantíferas; 4) intrusivos alcalinos ultrabásicos de tipo central con yacimientos apatita y tierras raras . En esta misma zona se forman todos los yacimientos de la serie exógena.