

Tema 7. Minerales petrogenéticos. Minerales y rocas de interés económico.

Se imparte en los siguientes cursos:

Primer Curso ESO Bloque II: Materiales terrestres

1º Bachillerato. Bloque 4: Los procesos petrogenéticos

2º Bachillerato. Ciencias de la Tierra y Medio ambiente. Bloque II: Los sistemas terrestres

2º Bachillerato. Geología optativa. Bloque: Materia y energía en la Tierra

7.1. Minerales Petrogenéticos

SUMARIO

7.1. Minerales Petrogénicos

7.1.1. Minerales Petrogenéticos de origen magmático. Los silicatos. Clases.

7.1.2. Minerales Petrogenéticos no silicatados

7.2. Yacimientos como accidente geoquímico:

7.2.1. Paragénesis mineral

7.2.2. Época y provincia metalogenética. Provincia metálica:

7.3. Génesis de los yacimientos de origen magmático

7.3.1 Procesos ortomagmáticos:

7.3.2. Procesos neumatolíticos:

7.3.3. Procesos hidrotermales:

7.4. Génesis de los yacimientos de origen sedimentario

7.5. Génesis de los yacimientos de origen metamórfico:

7.6. Minerales de interés económico

7.6.1 Yacimiento rentable

7.7. Clasificación y utilización de los recursos naturales:

7.7.1. Minerales aprovechados como menas metálicas:

7.7.2. Minerales aprovechables para la industria química y como fertilizantes:

7.7.3. Minerales aprovechados para otros usos:

7.7.4. La producción minera y el medio ambiente

7.8. Rocas de interés económico.

7.9. Principales recursos minerales y rocas de la Región de Murcia

7.1. Minerales Petrogenéticos

En el Tema 3 se aborda el estudio de la materia mineral y en él definíamos los conceptos de mineral y de roca. A ésta la definimos como un agregado natural, coherente, multigranular formado por uno o más minerales cristalinos, cristalizados o amorfos. En sentido estricto, por lo tanto, en este comienzo de tema hemos de abordar el estudio de aquellos minerales que forman rocas (minerales petrogenéticos).

De las más de 2000 especies de minerales que se conocen, sólo una docena forman parte de las rocas más comunes de la corteza terrestre. Los más importantes son los silicatos, siguiéndole en importancia los carbonatos, sulfatos y haluros, que constituyen rocas sedimentarias como calizas, dolomías, yeso y rocas salinas. El resto de minerales aparecen en las rocas en pequeñas cantidades o se localizan en yacimientos.

No obstante lo anterior y dado que, después hemos de abordar el estudio de los minerales de interés económico, bueno será que recordemos la clasificación de los minerales de Berzelius, basada en los grupos aniónicos. Establece ocho grupos:

I. Elementos nativos. C, S, Au, Ag, Cu, Pt.

II. Sulfidos. Sulfuros de Fe (pirita), Zn (Blenda), Pb (galena), etc.

III. Óxidos e hidróxidos: Pirolusita (MnO_2), Oligisto (Fe_2O_3), Corindón (Al_2O_3), Casiterita (SnO_2), etc.

IV. Halogenuros: Silvina (KCl), Carnalita (cloruro potásico y cálcico), Sal común (NaCl), etc.

V. Carbonatos (Calcita), Nitratos, Boratos, Iodatos

VI. Sulfatos (yeso, anhidrita), Cromatos, Molibdatos, Wolframatos, etc.

VII. Fosfato, Arseniato, Vanadatos.

VIII. Silicatos. Supone 1/3 de los minerales existentes y el 99 % de la corteza, constituyendo, con diferencia, el grupo de minerales petrogenéticos más abundantes.

Hay otras clasificaciones que establecen 12 clases como consecuencia de individualizar en clase distintas los grupos incluidos en las clases V, VI y VII, y añadir el grupo de las **sulfosales**: minerales compuestos por Pb, Zn o Ag en combinación con S y Sb o As y Bi, como la pirargirita (S_3SbAg_3)

7.1.1. Minerales Petrogenéticos de origen magmático

Un magma es una mezcla compleja de silicatos fundidos que se encuentran a t^a elevadas, desde los 700 °C a los 1.000 o 1.500 °C, y que contiene proporción considerable de agua y otros compuestos (CO_2 , F, Cl, Br...), que son volátiles a la presión ordinaria, pero que, a las grandes presiones existentes en el interior de la corteza terrestre, pueden permanecer incorporados al sistema en fusión.

La coexistencia de componentes de diverso grado de volatilidad en un magma tiene la importante consecuencia geológica de que el punto de fusión de la mezcla queda por debajo del que correspondería a cada uno de los componentes aislados. Mientras que el cuarzo funde a 1713 °C, y la mayor parte de los silicatos se funden entre los 1.100 y 1.600 °C, las mezclas silicatadas permanecen fluidas y no se consolidan hasta que descienden a los 1.000 °C. Los compuestos fácilmente volátiles, rebajan el punto de fusión aún más, en unos 300-400 °C. Los magmas se originan en el manto superior y en la base de la corteza, desde allí sufren un proceso de migración lento o rápido, según su composición química, hasta que se consolidan por enfriamiento.

Su composición química se ha averiguado a partir de análisis de las rocas magmáticas a que dan lugar. El 99 % del volumen total de las rocas ígneas está constituido únicamente por los ocho elementos geoquímicos más abundantes (oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio y magnesio), y la fracción restante, por un gran nº de elementos raros, llamados elementos traza (Ti, P, H, Zn, Ni, Cr, Sn, U, Th,...) muchos de los cuales se concentran en las rocas ígneas, dando yacimientos de interés económico.

Se ha observado que la composición química de las rocas plutónicas coincide con sus equivalentes volcánicas, situadas en las mismas provincias petrográficas de la Tierra. Consultar el tema 4.

Los silicatos.

Representan el 25 % de los minerales conocidos y el 40 % de los más frecuentes y, además, son los componentes fundamentales de las rocas magmáticas.

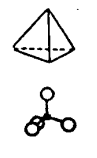
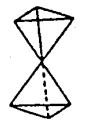
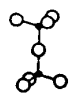
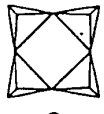
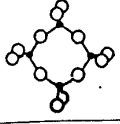
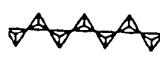
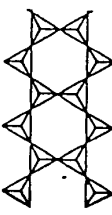
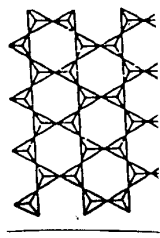
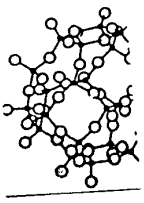
Los silicatos se dividen en subclases atendiendo a un criterio estructural. La unidad básica de un silicato puede considerarse un tetraedro, en cuyos vértices se sitúan iones Oxígeno (O), tangentes entre sí, y en el hueco central, un ión de Silicio (Si), de pequeño volumen. El enlace Si-O es muy fuerte y de naturaleza intermedia entre iónico y covalente. Los tetraedros pueden unirse entre sí compartiendo un sólo oxígeno. En estos tetraedros puede sustituirse el Si por Al. En ambos casos los tetraedros no son eléctricamente neutros, por lo que tetraedros vecinos tienden a unirse entre sí por una serie de cationes que actúan como verdadero cemento. La fórmula general de un silicato es: $X_m Y_n (Z_p O_q)_w$.

X = cationes grandes: K^+ , Ca^{++} , Na^+

Y = Cationes de tamaño medio Al^{+++} , Fe^{++} , Fe^{+++} , Mn^{++} , Mg^{++} , Ti^{++++}

Z = Cationes pequeños: Si^{4+} , Al^{+++} ; O = Oxígeno; W = Aniones adicionales $(OH)^-$, Cl^- , F^-

Un estudio minucioso de todos los silicatos se saldría de las posibilidades de este tema, fijaremos la atención sólo en aquellos que tienen mayor significado geológico, simplificando sus características que podemos encontrar, por otra parte, descritas en cualquiera de las muchas claves que hay en el mercado.

NESOSILICATOS (SiO_4) ⁴⁻	SOROSILICATOS (Si_2O_7) ⁶⁻	CICLOSILICATOS (Si_6O_{18}) ¹²⁻	INOSILICATOS (SiO_3) ²⁻ , (Si_4O_{11}) ⁶⁻	FILOSILICATOS (Si_2O_5) ²⁻	TECTOSILICATOS SiO_2
	 	 	 		

Subclase Nesosilicatos.

Son tetraedros de SiO_4 ligados entre sí por cationes (Mg^{++} , Fe^{++}), pero sin ningún punto de contacto con los tetraedros vecinos. La proporción Si:O es 1:4.

Los **Olivinos** constituyen una serie isomorfa cuyos términos extremos son la **Fonsterita** (SiO_4Mg_2) y la **Fayalita** (SiO_4Fe_2). Cada tetraedro de sílice está unido a dos iones bivalentes y cada O a un Si y a tres Mg^{++} ó Fe^{++} . Por esto forman cristales compactos con alto índice de refracción. Su color es verde oliva a amarillento. Rómbico. Al alterarse pasa a serpentina dejando el Fe sobrante en forma de hematites. Típico en rocas básicas y ultrabásicas (peridotitas, gabros o basaltos). Dureza 6'5-7, brillo vítreo, color verde oliva, grisáceo o pardo.

Granates, cúbicos, de fórmula general $Y_2X_3(SiO_4)_3$, donde $Y^{+++} = Al, Fe, Cr$; y $X^{++} = Fe, Mg, Ca$ y Mn . El más común es el granate Almandino (Al_2OSiO_4). Cristalizan en el cúbico (rombododecaedros). Su color depende de su composición (rojo, rosa, pardo, etc.), dureza 6'5-8, brillo vítreo. Es un mineral accesorio en rocas metamórficas (esquistos micáceo, gneis) y en algunas magmáticas (peridotitas, pegmatitas)

Otros minerales del grupo son **Andalucita** (Al_2SiO_5) y **Sillimanita** (Al_2SiO_5), ambos rómbicos, y la **Cianita o Distena** del triclínico. Estos tres minerales, como vimos en el tema 5, son polimorfos. La andalucita tiene forma de prisma (rómbico), color rosa-rojizo, dureza 2'7, se encuentra en pizarras y en las aureolas de contacto. La sillimanita (rómbico), aparece como cristales aciculares, color gris-verdoso, dureza 6'7 y aparece en rocas de alto grado de metamorfismo (gneises y esquistos cristalinos). La distena o cianita (triclínico) aparece como cristales laminares, azulada, su dureza varía con la dirección (4'5 en una y 7 en la dirección perpendicular a la anterior).

Subclase Sorosilicatos.

Grupo de dos tetraedros que comparten un vértice, unidas unas parejas con otras por medio de cationes. Proporción Si:O = 2:7

Epidota $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$. Monoclínico. Aparecen parejas de tetraedros y tetraedros independientes., verde amarillenta, brillo vítreo, dureza 6'5. Aparece en roca metamórficas asociada a la clorita (esquistos verdes) y en la aureola de contacto de las calizas.

Subclase Ciclosilicatos.

Grupo de tetraedros que, compartiendo cada dos un vértice, forman anillos de 3, 4 o 6 (Berilo y Turmalina). Cada tetraedro comparte dos oxígenos con tetraedros vecinos. $\text{Si:O} = 1:3$

Turmalina $(\text{Na}(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_6[(\text{OH})_4(\text{BO}_3)(\text{Si}_6\text{O}_{18})])$. Trigonal. La gran variedad de cationes que pueden presentar hace que existan distintas variedades. La variedad más frecuente es el Chorlo. Al microscopio da un color pardo oscuro, verde o amarillento. Dureza 2'75, brillo vítreo. Pueden formar prismas de hasta 40 cm Cordierita. Rómbico. Silicato de Al y Mg.

Berilo $(\text{Al}_2\text{B}_3)(\text{Si}_6\text{O}_{18})$. Hexagonal. En las pegmatitas sus cristales pueden alcanzar gran tamaño. Las variedades de color verde son las esmeraldas y las de azul pálido son las aguamarinas. Brillo vítreo, dureza 7'5-8. Forma prismas o columnas que llegan a pesar varias decenas de kilos (en estados Unidos se encontró un cristal de 9 metros y de 25.000 kg

Subclase Inosilicatos.

Tetraedros unidos formando cadenas más o menos lineales. Si las cadenas son sencillas ($\text{Si:O} = 1:3$), forman el grupo de los **Piroxenos**, siendo la **Augita** el más importante. Constituyen un conjunto de varias series isomorfas, según cristalicen en el rómbico o en el monoclínico. Son típicas sus líneas de exfoliación perpendiculares entre sí, lo que les distingue de los anfíboles. Negra o verde oscura, brillo vítreo, dureza 5-6. Aparecen como componentes de rocas ígneas básicas y ultrabásicas (gabros, basaltos, andesitas) y algunas metamórficas (gneis).

Rómbico: la serie **Enstatita-Hiperstena**. Presenta una concentración de Fe^{++} del 5 % o más (15 % en Broncita). La hiperstena presenta pleocroísmo muy acusado.

Monoclínico: Diópsido-Hedembergita (sustitución de Fe por Mg); la Augita común aparece n forma de cristales negros o verdosos a menudo maclados y la Egirina-Jadeíta (proviene de magmas ricos en Na), también presenta pleocroísmo.

Anfíboles: Están formados por dobles cadenas de tetraedros ($\text{Si:O} = 4:11$), su complejidad química es muy considerable, presentando numerosos series isomorfas. La **Hornblenda** es monoclínica, sus líneas de exfoliación forman un ángulo de 120° . Su aspecto prismático es el resultado de la combinación de varias formas simples. Pleocróica. En realidad es una serie isomorfa, brillo vítreo, dureza 5-6. Aparece en rocas ígneas (dioritas) y metamórficas (esquistos y gneis); en las anfíbolitas es el principal mineral.

Subclase Filosilicatos.

Los tetraedros se agrupan compartiendo tres vértices entre sí, y formando planos que se apilan unidos por enlaces débiles ($\text{Si:O} = 2:5$), el cuarto oxígeno de los tetraedros se unen a cationes (Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+}) que, as u vez, están unidos a OH^- , constituyendo capas intermedias de las capas de tetraedros. Ambos conjuntos se unen paralelamente unos a otros por enlaces débiles de Van der Waals o por medio de cationes, lo que les confiere el aspecto hojoso y la fácil exfoliación. Se distinguen varias familias:

Familia de las micas: Tienen una estructura en hojas que hace muy patente su exfoliación. Monoclínico, tanto la **Biotita** (mica negra) $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, como la **Moscovita** (mica blanca) $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, son componentes constantes de las rocas ígneas (graníticas y filonianas asociadas). También son muy frecuentes en las rocas metamórficas. La Biotita se altera más fácilmente, por lo que, en rocas sedimentarias, a veces, sólo aparece la moscovita. Biotita es pleocroica; ambas presentan vivos colores de interferencias

En algunos tetraedros el Al sustituye al Si, por lo que, para compensar las cargas debe entrar K^+ , lo que hace que presenten una exfoliación menos evidente (flogopita). La dureza oscila entre 2 y 3. Aparecen en granitos, sienitas, pegmatitas, esquistos y gneis.

La alteración de biotita, hornblenda, granate y otros minerales silicatados de Mg y Fe, origina minerales que forman el grupo de las **cloritas**, de aspecto similar a las micas, se encuentra diseminada en muchos esquistos y calizas (les da color verde).

Familia de las arcillas: Montmorillonita y Caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ambas del monoclinico. Estos minerales se forman por meteorización de otros minerales (feldespatos, piroxenos, anfíboles, olivino), su aspecto es terroso o pulverulento. El más frecuente es la caolinita, con diversas coloraciones, dureza 2-2'5; se forma por meteorización de feldespatos y micas.

Subclase Tectosilicatos.

Cada tetraedro comparte sus cuatro vértices con los tetraedros vecinos, de modo que existe una red tridimensional de tetraedros en cuyos huecos se disponen los cationes ($\text{Si}:\text{O} = 1:2$). Son muy abundantes en las rocas. Su fórmula se puede representar como Si_4O_8 .

Cuarzo. Trigonal. Responde al esquema Si_4O_8 ; si este esquema se repite indefinidamente, tenemos una estructura totalmente formada por sílice (SiO_2), se trata del cuarzo y sus polimorfos (**Tridimita y Cristobalita**). El cuarzo es el más frecuente y el más común de los minerales. Los polimorfos se forman a t^a altas y presión baja. A presiones elevadas sólo es estable el cuarzo, por eso es un mineral típico de rocas plutónicas profundas o incluso filonianas de enfriamiento suficientemente lento. Las variedades polimorfas sólo se encuentran en rocas volcánicas y, por tanto, de enfriamiento rápido. El cuarzo de alta t^a (**cuarzo β**), se forma a 570°C y se mantiene como tal hasta los 870°C , a esa t^a se transforma en tridimita; si se hace descender la t^a de nuevo, por debajo de los 570°C , pasa a **cuarzo α** o de baja t^a . A veces la forma cristalográfica externa es β y la interna α , dadas las condiciones de cristalización. El estudio de la forma en la que se presenta el cuarzo en las rocas plutónicas, es de gran utilidad para deducir sus condiciones de formación.

Entre las variedades cripto-cristalinas del cuarzo deben citarse: la Calcedonia, con bellas coloraciones y que cuando reviste amigdaloides recibe el nombre de **Ágata**; el **Ónice** y la **Carneola**, de color rojo sangre que se utiliza en joyería. El Jaspe es calcedonia opaca, muy coloreada que, cuando toma color verde con manchas rojas, se llama Heliotropo. La variedad más abundante en España es el Pedernal o Sílex.

El **Ópalo** ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) es hidrogel de sílice, se presenta en masas arrionadas, en pseudomorfosis y como fosilizante. Tiene diversas variedades: ópalo noble (apreciado en joyería), ópalo común, ópalo prasio, de color verde, etc.

Feldespatos. Alguno de los átomos de Si puede ser sustituido por Al, la diferencia de valencia permite que entre un catión (casi siempre monovalente). Según el catión que entre en la red distinguimos entre: **Feldespatos calcosódicos o Plagioclasas.** Triclínico. Forman la **serie isomorfa de la Albíta-Anortita**, según el catión sea Na^+ (Albíta) o Ca^{++} (Anortita), en este segundo caso son dos los átomos de Si sustituidos por Al. El porcentaje de cada uno de los cationes es progresivo, se establecen unos intervalos entre ellos para dar nombre a los compuestos intermedios de la serie isomorfa: Albíta ($\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$) y Anortita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Ca}$), entre ellos se sitúa con cantidades decrecientes de Na y crecientes de Ca (Oligoclasa, Andesina, Labradorita y Bitownita). Con el microscopio las plagioclasas se reconocen con facilidad por las maclas polisintéticas que forman.

Si el magma se enfría con rapidez no es posible la desmezcla entre feldespatos sódicos y potásicos (sanidina).

Feldespatos potásicos u Ortoclasas. El catión que entra en la red es el K. Presentan dos formas polimórficas de cristalización: la **Ortosa** (monoclinica) y la Microclina (triclínica) son formas polimorfas. La ortosa aparece en lavas de baja t^a y en rocas plutónicas y filonianas de consolidación no muy profunda; la **microclina** (KAlSi_3O_8) aparece en rocas de origen más profundo. La ortosa puede aparecer en grandes cristales típicamente maclados.

La estructura de los feldespatos está constituida por cadenas ondulantes de anillos de cuatro de estos tetraedros, dispuestas paralelamente y unidas unas a otras.

Feldespatoides. Son semejantes a los feldespatos pero con menor contenido en SiO_2 . Los más importantes son la **Nefelina** (SiAlO_4Na) y la **Leucita** ($\text{Si}_2\text{Al}_6\text{K}$). Se las puede considerar como derivadas de la albíta (por falta de dos moléculas de sílice) y de la ortosa (por pérdida de una molécula de sílice), respectivamente.

La Nefelina es en realidad una mezcla isomorfa sódico-potásica, aparece en rocas volcánicas e, incluso, plutónicas alcalinas. Hexagonal.

La Leucita sólo se encuentra en las rocas volcánicas de algunas regiones y corresponde a altas t^a de formación, cristaliza en forma de típicos icositetraedros. Pertenece a la singonía cúbica que, al enfriarse, pasa a tetragonal.

Condiciones de formación de los diferentes grupos y especies

Relacionando la composición química con los diferentes grupos de silicatos que hemos establecido en función de las estructuras, podemos extraer algunas conclusiones.

Conforme la estructura se va haciendo más compleja, mayor será el nº de oxígenos compartidos entre los diferentes tetraedros, lo que implica una disminución en la relación Si/O en cada uno de los grupos establecidos. Así de una relación Si/O de 1/4 en los nesosilicatos, pasamos a una 1/2 en los tectosilicatos, donde, teóricamente, como todos los vértices están compartidos, en cada uno de ellos podemos considerar existente medio átomo de oxígeno, que constituyen dos átomos en total por cada uno de Silicio. Las condiciones de formación, a igualdad de otras circunstancias, viene determinada por las condiciones de Presión y T^a . A mayor P y T^a las redes tenderán a ser más sencillas. Ello explica que los silicatos con redes estructurales sencillas indiquen, en general, condiciones de formación de mayor T^a y una determinada composición química; mientras que las redes complejas (tecto y filosilicatos), pueden formarse en condiciones sumamente bajas de P y T^a si la proporción de sílice es la adecuada.

Así pues, cuando la composición química del magma originario es pobre en sílice, tenderán a formarse silicatos en los que la relación Si/O es favorable al oxígeno (neso, soro e inosilicatos). Si la composición del magma es más rica en sílice, la relación Si/O será cada vez más desfavorable al Oxígeno (Tectosilicatos) si aún queda sílice libre, se originará la forma correspondiente de la misma en equilibrio con la t^a de formación : cuarzo, cristobalita o tridimita.

Para una determinada composición del magma, de acuerdo con las restantes condiciones, comenzarán a cristalizar silicatos de mayor punto de fusión, que son precisamente las redes más sencillas (si no interfieren otras condiciones) y, por tanto, de relación Si/O baja. Conforme estos minerales van precipitando, la cantidad de silicio, la cantidad de silicio que se ha eliminado es menor, comparativamente, que la de oxígeno, con lo que el magma residual se va enriqueciendo (en términos relativos) en silicio y componentes alcalinos y las condiciones químicas exigen la precipitación de silicatos cada vez más ricos en sílice. Como este fenómeno no se realiza exclusivamente para el silicio y el oxígeno, sino que también ocurre para otros elementos químicos que son los que integran las redes concretas de los minerales formados, este razonamiento también se puede extender a todos los cationes del medio.

Entre estos minerales petrogenéticos se distinguen dos grupos:

a) **Fundamentales:** constituyen casi el volumen total de las rocas ígneas, y se dividen en:

- **Leucocratos:** o claros, no poseen ni Fe ni Mg. Típicos de las rocas ácidas, ricas en sílice. Pertenecen a este grupo los siguientes: cuarzo, feldespatoideos, feldespatos alcalinos (ortoclasas) y calcoalcalinos (plagioclasas) y la mica potásica o blanca (moscovita).
- **Melanocratos:** oscuros, ferromagnesianos típicos de rocas básicas, con déficit de sílice y ricos en Fe y Mg, los más típicos son: olivino, piroxenos (augita, enstatita, hiperstena), anfíboles (tremolita, hornblenda) y la mica férrica o negra (biotita).

b) **Accesorios:** Acompañan en pequeña proporción a los silicatos. Los más importantes algunos óxido Rutilo TiO_2 ; Magnetita, Oligisto, corindón), silicatos (granate, esfena) y, a veces pirita y apatito.

7.1.2. Minerales Petrogenéticos no silicatados

CARBONATOS

Todos los carbonatos tienen como unidad estructural en anión de forma triangular $\text{CO}_3^{=}$, coordinados entre sí mediante cationes metálicos divalentes (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Pb, Cu). Destacan en este grupo la calcita y la dolomita que forman las rocas calizas, el mármol y las dolomías.

En los minerales del grupo de la calcita la celda unidad es romboédrica con cationes en los vértices y en el interior dos grupos $\text{CO}_3^{=}$, según el catión, resultan distintas especies de carbonatos: Calcita (CO_3Ca), Magnesita (CO_3Mg), Siderita (CO_3Fe), Rodocrosita (CO_3Mn), Smithsonita (CO_3Zn) y Dolomita ($(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$).

Entre magnesita, siderita y rodocrosita hay series isomorfas completas, debido a la similitud de tamaño de los cationes. En la **dolomita**, dado que los cationes Ca y Mg tienen distinto tamaño, aparecen en igual cantidad y se disponen en capas alternas. La sustitución del catión Ca sólo es total con el Mn^{++} .

La densidad depende del catión siendo mayor la de la magnesita, la dureza, dado que el enlace es iónico, es media baja (3-5 en la escala de Mohs). La exfoliación característica es en romboedros, según tres planos que se cortan oblicuamente.

La **calcita** es el mineral más común, es el mineral más abundante en calizas y mármol y, también es muy abundante, en las margas y areniscas calcáreas. La **dolomita**, menos abundante, es el principal mineral de las dolomías y del mármol dolomítico.

El **aragonito** es un polimorfo de la calcita, mucho menos frecuente, ya que es menos estable; por eso no forma rocas. Se deposita en fuentes hidrotermales y forma los caparazones de algunos moluscos y equinodermos. Su empaquetamiento es más denso que la calcita (róbico) y por eso es más denso y duro que ella. Se suele presentar en maclas de aspecto hexagonal, formadas por la unión de tres prismas rómbicos.

SULFATOS

El ión $\text{SO}_4^{=}$ está constituido por un átomo de S en el centro de un tetraedro cuyos vértices están ocupados por oxígenos, unidos a aquél por enlaces covalentes, no pudiendo compartir oxígenos distintos tetraedros. El mineral más frecuente es el **yeso** ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), monoclinico; estructura hojosa formada por capas dobles de iones sulfato, unidos por Ca^{++} ; entre las dobles capas hay moléculas de agua. Debido a esta estructura presenta exfoliación laminar o en forma de granos o fibras; blando (2). Forma la roca sedimentaria del mismo nombre, que suele aparecer asociada con otras rocas salinas, habiendo precipitado como éstas a partir de disoluciones acuosas; también se puede formar por hidratación de estratos de anhidrita, lo que provoca un aumento de volumen de hasta el 60 % que hace plegarse a los estratos.

La **anhidrita** es menos frecuente que el yeso, carece de agua. Rómbica, no presenta, por tanto, exfoliación laminar, dureza (3-3'5). En algunos lugares aparece como roca, formando estratos extensos y potentes.

HALUROS

Los minerales petrográficos más frecuentes son: Halita, Silvina, Carnalita y Fluorita.

Halita. (ClNa): es el más común (sal de roca). Red cúbica de caras centradas formada por Na^+ , y otra red igual formada por Cl^- , ambas interpenetradas. Dado el enlace iónico, su dureza es baja, soluble, bajo punto de fusión, etc. Forma cristales cúbicos y exfoliación cúbica. También se puede presentar en masas o granos de color blanco o incoloro. Suele presentarse como roca en masas o estratos intercalados entre otras rocas sedimentarias; aparece asociada a yeso, anhidrita, caliza y arcilla. Se forma por precipitación.

Silvina. (ClK): Presenta la misma estructura que la halita. Soluble, sabor salado y amargo, incolora, blanca o, debido a impurezas, amarillenta-rojiza. Masa granulares con exfoliación cúbica. Aparece asociada a la halita, formando extensos depósitos, teniendo su mismo origen, aunque sea de las últimas en precipitar.

Carnalita. ($\text{Cl}_3\text{KMg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Rómbica, aunque suele presentarse con aspecto granular. Blanca o rojiza (contiene oligisto). Amarga, soluble. Asociada a las dos anteriores, presenta el mismo origen.

Fluorita (F_2Ca). Mineral frecuente en los filones, o como accesorio en pegmatitas y otras rocas ígneas, así como en calizas y dolomías. Presenta colores muy variados, brillo vítreo; expuesta a los rayos X, UV o catódicos es fluorescente. Exfoliación octaédrica, dureza 4.

ÓXIDOS

Magnetita $\text{Fe}_3\text{O}_4 = (\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{FeO}$: es un mineral accesorio de muchas rocas ígneas (dioritas gabros, peridotitas), metamórficas y sedimentarias; también se encuentra, como veremos después formando yacimientos de segregación magmática. Cúbico (octaedros). Negro. Dureza 6. Es atraída por el imán y algunas variedades se comportan como imanes naturales.

Oligisto o hematites (Fe_2O_3). Importante mena de hierro, se encuentra difundido en rocas de todo tipo y edad. Presenta dos variedades

Oligisto o especularita. Cristales de aspecto tabular a veces agrupados en forma de roseta, gris, brillo metálico. Puede aparecer en forma de escamas (oligisto micáceo) en zonas de intenso metamorfismo. Raya roja.

Hematites roja aparece en forma de masas compactas, terrosas y rojizas. Trigonal, dureza 5'5-6'6. Se encuentra como mineral accesorio en el granito. En areniscas rojas forma parte del cemento. En rocas puede aparecer, además de como oligisto micáceo, formando grandes masas, resultando de la transformación de limonita, siderita o magnetita. Aparece en filones hidrotermales en zonas de metamorfismo de contacto.

Limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Amorfa, se forma por meteorización de otros minerales de hierro y suele aparecer en masas concrecionadas o terrosas. Puede también formarse por precipitación química o bioquímica.

Parda oscura, brillo vítreo, raya castaño-amarillenta, dureza 5-5'5 (en polvo es 1). Junto a la goethita forma la capa de alteración que se forma en los filones de minerales de estaño. También aparece dispersa en arcillas y muchos suelos

Goethita (FeOOH). También se forma, como hemos dicho, por meteorización de otros minerales de hierro y por precipitación. Rómbica, cristales aciculares y concreciones; pardo amarillenta o pardo oscura, brillo semimetálico, dureza 5-5'5. Fácil de confundir con la limonita.

Se encuentra diseminada en arcillas de descalcificación (resultante de la disolución del CO_3Ca de las rocas calizas); puede formar grandes depósitos, al igual que las lateritas procedentes de la meteorización de serpentinas.

Bauxita: Es una mezcla de óxidos de Al hidratados, formados por meteorización de feldespatos y feldespatoideos, bajo condiciones climáticas cálidas y húmedas (laterización). Sus componentes son: Boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), rómbica; Gibbsita o Hidrargilita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), monoclinica, y Diáspora (AlO_2H), rómbica. Todos ellos mezclados con caolín, sílice y óxidos de hierro. Dureza 1-3.

Aparece como masas terrosas, aspecto arcilloso, macizas o en concreciones de color gris, amarillo o rojizo. Se presenta en forma de capas superficiales, más o menos horizontales, en bolsadas o como lentejones interestratificados en series sedimentarias. Es la única mena del aluminio.

SULFUROS

Pirita, S_2Fe . Es el mineral más frecuente de esta clase y aparece en rocas y yacimientos de diverso origen. Mineral accesorio de rocas ígneas, aparece en yacimiento de segregación magmática y durante la fase hidrotermal, también aparece en zonas de metamorfismo regional y de contacto de baja intensidad y es común en rocas sedimentarias.

Cristaliza en el cúbico (cubos, pentagododecaedros o piritoedros, octaedros y formando maclas). Amarillo pálido, brillo metálico, frágil, exfoliación cúbica mala, dureza 6'6'5. Se meteoriza con facilidad dando limonita.

A $t^\circ > 750^\circ\text{C}$ se descompone en SFe (pirrotina) y S° , por eso no aparece en lavas. Se deposita en cienos con abundante materia orgánica y ambiente reductor.

Galena, SPb . Frecuente en filones hidrotermales y en yacimientos fruto de metamorfismo de contacto; aparece también en calizas sometidas a dolomitización formando bolsones, filones, etc. Gris, brillo metálico, forma cubos, exfoliación cúbica. Estructura tipo ClNa , dureza 2'5, muy pesada.

Blenda, SZn. Aparece asociada a la galena, a veces aparece en yacimientos de carbón. Cúbico, amarillo-castaño, brillo resinoso, exfoliación dodecaédrica, dureza 3-4.

FOSFATOS

Apatito, $(\text{PO}_4)_3\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$. Aparece en todo tipo de rocas, se presenta en dos variedades. Aparece cristalizado en rocas ígneas (sienitas nefelíticas y pegmatitas), filones hidrotermales y depósitos formados por metamorfismo de contacto.

La fosforita o colofana contiene cantidades variables de CO_3Ca , es una variedad criptocristalina. Forma la mayoría de las rocas fosfatadas. Su formación se debe a la acumulación de huesos y excrementos de vertebrados en los sedimentos originales.

Hexagonal. Incoloro, transparente o translúcido con colores variados (blanco, pardo-rojizo, verde amarillento, etc. Brillo vítreo o céreo. Dureza 5.

7.2. Yacimientos como accidente geoquímico:

A lo largo del ciclo petrogenético, se dan circunstancias favorables para que un elemento se concentre formando minerales. Estos minerales en los que participa un elemento químico ocupan lugares o yacimientos más o menos extensos, pero lo destacable es que el porcentaje que arroja elemento químico es muy superior al que le corresponde en el análisis químico medio de la corteza terrestre (Cu, Pb, Zn, Sn, Fe, Hg, Ni, C).

Estos ejemplos, que pueden aplicarse a todos los elementos químicos, indican que cualquier concentración superior a lo normal, y sobre todo si es muy superior, se debe a alguna circunstancia especial favorable que escapa a las leyes generales de distribución de los elementos químicos en la corteza terrestre; se trata de una excepción o accidente geoquímico.

Las causas que los provocan son muy variadas. Existen causas de ámbito general en los procesos petrogenéticos, donde se producen casos favorables de concentración. Además hay causas particulares, para cada uno de los elementos químicos que deciden que su presencia alcance altos porcentajes en un punto de la corteza.

7.2.1. Paragénesis mineral

Es la asociación de minerales en un yacimiento debido a cualquiera de las siguientes circunstancias:

- Origen común por condiciones físico-químicas favorables, como el caso de topacio y de la fluorita o de la blenda y la galena.
- Origen común en secuencia ordenada, como ocurre en algunos yacimientos metamórficos de contacto, donde los óxidos se disponen más próximos a la fuente magmática que los sulfuros del mismo metal.
- Coexistencia de minerales ascendientes y descendientes en fases intermedias de cambios físico-químicos; así, la pirita puede ser paragénica con la siderita al reaccionar los sulfuros con la caliza.

En sentido amplio, paragénesis significa "lo que se encuentra junto" y, en sentido estricto, "lo que se origina junto". Son dos aspectos muy distintos no bien delimitados en los tratados de Mineralogía.

Son frecuentes los yacimientos en los que se explota más de un mineral del mismo metal o varios minerales de distintos metales, en ambos casos paragénicos. Esos minerales se encuentran juntos y concentrados por haberlos afectado el mismo accidente geoquímico o por estar en fase de transición geoquímica.

7.2.2. Época y provincia metalogenética. Provincia metálica:

Época metalogenética es un periodo de tiempo en el que se produjeron determinados accidentes geoquímicos, que se manifiestan por la presencia de yacimientos minerales característicos. Por ejemplo, la época permotriásica se caracteriza por los depósitos de sal común, silvina y yeso en muchos lugares del mundo y por la deposición de extensas capas de fosfatos marinos en Norteamérica.

Las épocas precámbricas se caracterizan por grandes yacimientos de Fe, Cr, Au, Ag, Cu, Ni y W. La provincia metalogenética comprende todos los yacimientos que se formaron en un sistema orogénico

durante una época orogénica o metalogénica. Por ejemplo, la gran provincia cuprífera chileno-peruana de época terciaria o la diamantífera de Sudáfrica.

La **provincia metálica** comprende todos los yacimientos de un determinado metal de una unidad geológica regional, en general con afinidades geológicas. Así en la provincia metálica de Arizona hay yacimientos de Cu paleozoicos, cretácicos y terciarios, y en la provincia metálica mediterráneo-occidental hay yacimientos de Pb-Zn carboníferos, triásicos y terciarios.

7.3. Génesis de los yacimientos de origen magmático

Para el estudio de los procesos que originan yacimientos minerales de interés económico dividiremos estos procesos en tres grupos: magmáticos, sedimentarios y metamórficos.

En la solidificación de los magmas y en su acción sobre las rocas encajantes se presentan oportunidades para el enriquecimiento mineral y químico. Dentro de la mineralogénesis que se relacionan con los magmas dividiremos estos procesos en ortomagmáticos, pneumatolíticos e hidrotermales.

7.3.1 Procesos ortomagmáticos:

Se realizan a partir de minerales que cristalizan a t^a superiores los 600 °C. Esta fase de consolidación primaria no es muy propicia para la formación de buenos yacimientos. puede ocurrir que los minerales formados de peso específico más elevado que el magma se vayan al fondo por la llamada diferenciación por gravedad o segregación magmática. Así se explican **yacimientos de segregación** primaria como los de Bushveld (Sudáfrica), donde potentes capas de minerales de cromo y pirrotina que contienen platino ocupan la base de una masa plutónica. Los de **segregación secundaria** se forman a partir del magma residual que queda cuando la mayor parte del magma ha cristalizado. Ej. Montañas de Fe de Wyoming, Ni y Cu en Insirwa (Sudáfrica). Este magma residual puede ser inyectado en grietas formando filones.

Si la fracción metálica se introduce en fracturas, fallas o zonas de cizalla de la roca encajante, dan lugar a **inyecciones primarias**, de formas más o menos filonianas. epósitos de magnetita n Kiruna (Suecia).

Por **diseminación**. Cuando los minerales neoformados tienen un peso específico igual o menor que el líquido magmático, quedan flotando, que al solidificar, tales minerales aparecen diseminados en el seno de la roca. En general no tienen interés estos yacimientos originados por diseminación, a no ser que se trate de minerales muy valiosos como el diamante. Fenocristales de diamante diseminados en kimberlita (Kimberley, Sudáfrica), roca perteneciente a la familia de las peridotitas que yace en un neck efusivo.

La titanita (FeO_2Ti), se forma por segregación de magmas de tipo gabroide Quebec, Canadá). La pentlandita $[(\text{Fe},\text{Ni})\text{S}]$ aparece asociada a masas gabroides; el yacimiento de Sudbury (Canadá), uno de los mayores, tienen la curiosa característica es que el magma basáltico se formó partir del impacto de un meteorito. El Platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio, metales muy escasos aparecen concentrados junto al níquel en sus yacimientos de segregación.

Las temperaturas iguales o superiores a 600 °C, produce acción térmica sobre las rocas encajantes, pero no crea yacimientos explotables si no va acompañada de metasomatismo. Esta acción depende tanto del tipo de magma como de la roca encajante atacada. El magma aporta etales y no metales como S, B, Cl y F. las calizas son las más aptas para provocar yacimientos explotables, y muy poco aptas las areniscas. Esta acción metasomática puede originar importantes yacimientos de óxidos, como magnetita, oligisto y corindón; elementos nativos como oro, platino y grafito; de sulfuros como pirita, blenda y galena. Banato (Rumania) y Gora (Urales, URSS).

7.3.2. Procesos pneumatolíticos:

Se debe a la acción de gases y soluciones magmáticas sometidas a elevada presión y t^a que oscila entre 400-600 °C. La entrada de gases o soluciones en las fisuras de las rocas circundantes provocan reacciones que pueden dar lugar a importantes concentraciones de un mineral explotable por impregnación¹ de la roca encajante por parte de los fluidos a alta presión que se escapan del magma. A estos procesos también se

¹ Esta impregnación puede tener lugar en toda la masa de la roca, o bien en grietas (filón).

les llama pegmatíticos por coincidir con la formación de las pegmatitas, aunque dicha coincidencia no sea aceptada por todos los geólogos.

Relacionados directamente con las pegmatitas existen yacimientos comerciales, como los de Wolframio en Birmania, Molibdeno en Noruega, Aluminio en Groenlandia, Oro en Brasil y Estaño en la frontera hispano-portuguesa. En las pegmatitas aparecen con frecuencia minerales diversos y raros berilo, litio, itrio, cerio, niobio, tántalo, etc. A muchos yacimientos rentables de magnetita y oligisto se les atribuye este origen.

Aunque el proceso de formación de los diamantes no es exactamente igual al de un yacimiento neumatólico, se puede asimilar a éste. Como ya vimos, los diamantes se encuentran en kimberlitas, brechas formadas en la emisión explosiva de una mezcla de magma y volátiles a muy alta presión, en chimeneas cilíndricas y angostas que alcanzan gran profundidad. Se localizan en Sudáfrica, África occidental y Rusia.

7.3.3. Procesos hidrotermales:

Resultan de la actividad de soluciones acuosas en un intervalo de t° de 100-400 $^{\circ}\text{C}$. Las presiones y la t° a las que se hallan sometidas son muy variables, van descendiendo conforme nos alejamos de la cámara magmática.

Las soluciones acuosas, a veces en estado coloidal, contienen diversos cationes, ácido silícico y anión sulfuro, que son transportados a través de grietas y fallas o poros desde la cámara magmática hasta la misma superficie. Las causas principales de deposición o precipitación de las sustancias disueltas son el enfriamiento, la evaporación del medio disolvente, la pérdida de algunos componentes, como el CO_2 , que actúan como disolventes, el encuentro de dos soluciones que reaccionan entre sí y las reacciones con las rocas encajantes.

A partir de la cámara magmática se forman yacimientos **Hipotermales** a las t° y presiones más altas dentro del intervalo hidrotermal (300-500 $^{\circ}\text{C}$), por ejemplo yacimientos de wolframita, scheelita, galena, pirita, fluorita, turmalina, etc.

Mesotermales a t° medias (200-300 $^{\circ}\text{C}$). Minerales como oro, blenda, arsenopirita, calcita, siderita o rodocrosita, entre otros.

Epitermales, a t° bajas (50-200 $^{\circ}\text{C}$). Marcasita, cinabrio, cuarzo, ópalo, calcedonia, calcita, aragonito, baritina, entre otros.

Los depósitos pueden aparecer rellenando las grietas o fallas formando **filones**, como por ejemplo los compuestos metálicos, principalmente sulfuros, de gran interés económico (calcopirita, galena, blenda, galena, cinabrio, plata y oro). Destacan los yacimientos de Pb y Ag de Linares en La Carolina (Jaén).

En otras ocasiones **impregnan** rocas porosas o fracturadas, y también sustituyen por metasomatismo a los minerales de las rocas que atraviesan. Se pueden formar por circulación hidrotermal como los cinabrios de California o por procesos de metasomatismo como las cuarcitas que impregnan el cinabrio de Almadén (Ciudad Real). Los yacimientos considerados como hidrotermales con metasomatismo más o menos acusado son muy numerosos e importantes

Cobre. Además de encontrarse en filones, se puede encontrar disperso en masas enormes de rocas (cobre porfídico) en forma de calcopirita (CuFeS_2), muy fáciles de explotar (ley mínima del 0'5 %). Otro tipo de yacimiento de cobre son los depósitos estratiformes, relacionados con las chimeneas hidrotermales de las dorsales, por lo tanto se encuentran intercalados entre los sedimentos del fondo oceánico.

Plomo. Los yacimientos de Pb (galena, PbS) y cinc (esfalerita, ZnS) pueden ser hidrotermales o volcano-sedimentarios; los mayores son los llamados valle del Mississipi. Son de origen metamórfico, por reemplazamiento en calizas de Pb y Zn transportados por soluciones cargadas de sales (salmueras) a t° de 150 $^{\circ}\text{C}$. Probablemente estos fluidos tienen origen metamórfico y no magmático.

Mercurio. Se halla (cinabrio, HgS) en vetas hidrotermales y también en contacto entre materiales volcánicos y la roca encajante. La mayor parte de la producción mundial se obtiene de España e Italia.

Estaño y wolframio. Forman filones hidrotermales asociados a plutones graníticos. Los minerales fundamentales son la casiterita (SnO_2), la wolframita (FeWO_4) y la scheelita (CaWO_4). El estaño se explota en dos provincias metalogénicas, Indonesia y los Andes.

Molibdeno. La mayoría de la molibdenita (MoS_2) se encuentra en yacimientos semejantes a los de cobre porfídico (molibdenos diseminados), asociados también a plutones ácidos intruidos a poca profundidad (provincia metalogenética que va desde Méjico a Canadá). También se extrae como subproducto en los yacimientos de cobre porfídico.

7.4. Génesis de los yacimientos de origen sedimentario

Desde la meteorización hasta la petrificación sedimentaria existen muchas circunstancias favorables para la concentración y enriquecimiento de elementos químicos y para la formación de yacimientos útiles y rentables. Nos referimos a los siguientes procesos:

Concentración residual química: Tras la meteorización los productos de la descomposición química son transportados selectivamente, llegando a formar concentraciones de interés comercial. La composición de la roca madre es el factor determinante de la calidad y cantidad del material residual acumulado. Muchos depósitos residuales de hierro en regiones cálidas y húmedas superan el 50 % de Fe metal. Los de Mn en regiones tropicales o subtropicales. Los de aluminio procedentes de las bauxitas formadas en regiones tropicales y subtropicales.

Concentración residual mecánica: Algunos productos de disgregación mecánica permanecen inalterados químicamente. Son movidos según su peso específico, quedando los más pesados cerca de la fuente de suministro. Así se originan los placeres de Au (Alaska, California, Australia); de Pt (Urales, Colombia); de Sn (Malasia; diamantes (minas Gerais Brasil).

Los óxidos son los minerales que presentan una mayor estabilidad bajo las condiciones oxidantes de la atmósfera aunque muchos de ellos, por el ataque del agua, se transforman en hidróxidos.

Además del cuarzo, pueden aparecer distribuidos a lo largo de una red hidrográfica, casiterita (SnO_2), Zircón (ZrSiO_4), Ilmenita (TiFeO_3), Rutilo (TiO_2) y Wolframita (FeWO_4); junto con algunos elementos nativos (Ag, Au, diamantes). Los factores que determinan la separación de estos minerales más pesados de los más ligeros (cuarzo, feldespatos, etc.) son, su densidad (superior a 5'5), en combinación con la capacidad de selección y las variaciones en el régimen de flujo de los cursos fluviales.

La mayoría de los placeres se localizan en sedimentos blandos y sin consolidar, con edades que oscilan entre el Terciario y Cuaternario.

Precipitación sin evaporación: gran parte de los componentes rocosos son solubles en agua que contenga CO_2 , ácidos húmicos, otros ácidos orgánicos o SO_4^- . Las aguas continentales realizan el transporte y los depósitos en el mar o cuencas cerradas (lagos, pantanos, etc.). La precipitación sólo se produce si varían las condiciones físico-químicas y biológicas. El ambiente de depósito y la naturaleza del disolvente inciden en la forma de depósito. Entre los factores más destacables señalamos:

- Pérdida de CO_2 , pasando los bicarbonatos solubles a carbonatos insolubles.
- Acción bacteriana; bicarbonatos \longrightarrow hidróxidos insolubles
- Electrolitos marinos, soluciones coloidales \longrightarrow óxidos hidratados insolubles
- Acción de las plantas, oxidaciones, hidrólisis, reacción con calizas, con arcillas, etc..

Electrolitos de mares someros sobre soluciones de Fe \longrightarrow óxido férrico y carbonato de Fe con estructura oolítica (yacimientos de Fe Clinton desde Wisconsin a Alabama son los más ricos del mundo). Mn en Rusia.

Las Fosforitas son rocas compuestas por más de un 20 % de P_2O_5 que se presentan en diversas variedades de apatito o fosfato cálcico [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$]; se les designa con el nombre de **Fosfatos**. Se utilizan para fabricar abonos sintéticos, por lo que están experimentando cada vez más demanda.

Se trata de depósitos de origen sedimentario en cuya concentración interviene la actividad biológica, cuando no son una sencilla acumulación de restos orgánicos en áreas marinas. Pese a que algunos consideran que su origen se debe a una precipitación química similar a la de los bandeados férricos, la realidad muestra que siempre aparecen asociados a depósitos ricos en materia orgánica (pizarras carbonosas), o bien en relación con estructuras de origen orgánico como los "estromatolitos" (laminaciones producidas por algas marinas).

Los yacimientos más antiguos tienen unos 600 m.a. (Extremadura, Toledo, Ciudad Real). Dichas capas aparecen con una ley muy superior a la de otros yacimientos (Argelia, Marruecos, Túnez, USA), pero

presentan un volumen inferior, un carácter discontinuo y un desarrollo en profundidad, lo que encarece su explotación, por lo que no pueden ser considerados como reservas explotables.

Precipitación por evaporación: Origina yacimientos salinos al evaporarse el agua que mantenía disuelta las sales. Se puede realizar en el mar, lagos, aguas subterráneas e incluso a partir de aguas termales.

Precipitación de las sales marinas: Para que se realice la deposición, el agua marina debe aislarse (albuferas, lagos deltaicos, etc). En el orden de deposición influye la solubilidad, la acción de otras sales, la t° y la concentración salina. La secuencia de estratificación de las sales estudiadas es la siguiente: 1) Carbonatos. 2) Yeso, 3) Yeso y sal gema, 4) Anhidrita y sal gema, 5) Polihalita y sal gema, 6) Sulfatos de magnesio y sal gema, 7) Sulfatos de magnesio y potasio con sal gema, 8) Carnalita y sal gema.

Precipitación en lagos: No mantienen la uniformidad marina, al ser cada lago una cuenca particular, hay bastantes diferencias en la composición salina de unos y otros. Varias clases: Salado (misma composición que el océano pero más concentrado); amargos (predominio de Sulfato sódico); Alcalinos (Predominio de carbonato sódico); potásicos (abundancia de sulfato y carbonato potásico); boratos, etc.

Deposición subterránea y termal: En las regiones áridas los depósitos son semejantes a los de los lagos. Ej. yacimientos de nitratos en Chile, con notables cantidades de boro y yodo. Se admite que estos nitratos fueron transportados por aguas subterráneas que después se evaporaron. Las aguas termales también producen depósitos al evaporarse el agua, aunque estos carecen de valor comercial.

Enriquecimiento supergénico: Algunos yacimientos sin interés económico, pueden enriquecerse y alcanzar la categoría de explotables, cuando alcanzan niveles superiores, donde el oxígeno atmosférico y las aguas penetran en el yacimiento. Se les llama yacimientos supergénicos, en oposición a los de génesis más profunda o endogénicos. Por este procedimiento se alcanzan concentraciones de sulfuros metálicos, sobre todo de cobre y plata, de importancia económica.

Si partimos de un filón con sulfuros de Fe-Cu (calcopirita, pirita, etc.), la acción del agua meteórica cargada con O_2 y CO_2 da lugar a la destrucción de los sulfuros, dejando libres, en solución, parte de sus elementos, que son arrastrados hacia zonas más profundas (de carácter reductor), donde reaccionan con los sulfuros existentes y forman nuevos sulfuros (sulfuros secundarios o de enriquecimiento supergénico).

En esta mineralización filoniana se distinguen tres zonas:

- **Zona de oxidación.** Situada en la parte superior saturada de O_2 y CO_2 , en la que el agua circula libremente. Se extiende hasta el nivel freático. Contiene óxidos, hidróxidos, carbonatos y sulfatos de Fe y Cu. La parte superior presenta un intenso color rojo (montera de oxidación o gossan)
- **Zona de enriquecimiento supergénico o de cementación.** Por debajo del nivel freático. El agua, con poco oxígeno y cargada con los elementos lixiviados circula con lentitud. Se originan mineralizaciones con leyes superiores a las del yacimiento original.
- **Zona primaria.** Corresponde al yacimiento primario sin alterar (minerales hipogénicos).

En el desarrollo de estas zonas influyen una serie de factores como el tipo de roca encajante, el grado de fracturación del yacimiento, las fluctuaciones del nivel freático o la velocidad de erosión (que puede ser más rápida que la velocidad de alteración, impidiendo dicho desarrollo).

El interés de este proceso se debe, no sólo a su posible interés económico, sino también en que constituye un indicio de la posible presencia de un yacimiento en profundidad.

Los yacimientos de Fe sedimentario, producidos por precipitación química, constituyen la mena principal de extracción de este elemento. De ellos los más abundantes son los conocidos como formaciones férricas bandeadas, por presentar una estructura interna según láminas milimétricas en las que alternan niveles oscuros (óxidos e hidróxidos de Fe), alternando con niveles claros ricos en sílice y debidos a la acumulación de caparzones silíceos de microorganismos que proliferaron durante los meses cálidos (variaciones estacionales). Los yacimientos de este tipo más importantes se encuentran junto al lago Superior (Norteamérica), donde las capas mineralizadas pueden alcanzar espesores de hasta 600 m. a lo largo de varios cientos de km.

Su origen ha sido objeto de polémica, ya que aparecen minerales de Fe oxidado y otros en estado reducido y, por otro lado, es sabido que el Fe^{+++} precipita rápidamente, mientras que el Fe^{++} puede ser transportado a grandes distancias.

Otros yacimientos metálicos estratiformes o de origen sedimentario son los depósitos de sulfuros de Cu, Pb y Zn, acumulados por precipitación química en ausencia de oxígeno (salmueras). Dichos elementos fueron aportados por aguas termales (yacimientos de Zambia y Zaire) o aguas someras (Kupferschiefer), formando yacimientos de poco espesor (apenas un metro) pero una gran extensión (Reino Unido y Norte de Europa). En el mar Rojo se están produciendo depósitos de este tipo, gracias a la formación de "salmueras" por aportes de origen volcánico del rift en formación.

En estrecha relación con las emanaciones submarinas de elementos metálicos también se producen otros minerales metálicos (**nódulos de Manganeso**)², por precipitación química y con la participación de actividad bacteriana. Llegan a alcanzar los 10 kg/m², aunque no son explotables.

7.5. Génesis de los yacimientos de origen metamórfico:

Cuando los factores metamórficos actúan sobre las rocas o sobre los yacimientos minerales sedimentarios y magmáticos, provocan transformaciones diversas originando nuevos minerales y nuevas estructuras. Unas veces concentran el mineral útil y otras lo dispersan. Citaremos algunas posibilidades:

- Metamorfismo de contacto y metasomatismo pueden incluirse dentro de estos procesos.
- De origen metamórfico, fuera de toda duda, son: Crisolito (silicato hidratado de Mg) a partir de peridotitas o carbonatos de magnesio. Talco a partir de materiales magnésicos alterados y suave incidencia metamórfica. Grafito, procedente de carbones o de CaCO₃ con materia orgánica. Mármoles, procedentes de calizas. Importantes concentraciones de distena, granates, andalucita, sillimanita y esmeril.
- Como consecuencia de la granitización por ultrametamorfismo, los elementos químicos de menor radio iónico (Fe, Mg, Ti, Co, Ni y Cu), son los más móviles y originan un frente básico fuera de la zona de granitización, donde pueden originar yacimientos de dichos metales.

Los minerales más importantes formados por procesos metamórficos que dan lugar a yacimientos son:

- Grafito. Deriva de la materia orgánica que contenía la roca original.
- Asbesto. Fibras asociadas a serpentinas y anfíbolitas. Se usaba como aislante térmico.
- Talco. Se origina a partir de metamorfismo de materiales magnésicos.
- Silicatos de Al. Andalucita, sillimanita y distena. Se usan como refractarios de alto grado y se emplean en cerámica.
- Granate. Se encuentra asociado a micaesquistos, micacitas, gneis y donde se pueda acumular en condiciones adecuadas para formar yacimientos.
- Esmeril. Mezcla de corindón y magnetita que se forma mediante metamorfismo de contacto. Se utiliza como abrasivo para pulir metales.

7.6. Minerales de interés económico

En el sentido más simple y amplio, yacimiento es "el lugar donde un mineral se encuentra o yace". Desde este punto de vista un grano microscópico de magnetita o de apatito incluido en una lámina de biotita tiene tanta categoría de yacimiento como una masiva concentración comercial de hierro o de fosfato.

Un concepto más restrictivo define yacimiento como "el lugar donde un mineral se halla concentrado". Aquí quedan incluidos todos los yacimientos de cualquier clase de sustancia mineral de la que existan cantidades considerables, aunque no exista interés por su explotación. Por ejemplo, miles de Tm. de un dique de cuarzo o extensos estratos de calcita.

Otra restricción es la utilidad. Entonces la definición de yacimiento sería "el lugar donde un mineral útil se halla concentrado". A pesar de hallarse concentrado puede no interesar su explotación por diferentes motivos.

Finalmente, la última característica que se ha de añadir es la económica, quedando así la definición "el lugar donde un mineral útil se halla concentrado y su explotación es rentable".

Mena es un mineral del que se extrae un metal. Por lo tanto se trata de toda masa mineral de aspecto metálico, pero este término se emplea más ampliamente. La limonita, sin aspecto metálico, se considera una

² Tiene un diámetro entre 1 - 15 cm (ley entre 27 - 30 %)

mena ya que se utiliza para obtener un metal. La fluorita, no es una mena, ya que de ella se extrae Ca, y éste no es un metal.

Ley de una mena (ley media) es la concentración de un metal en un yacimiento. Se calcula mediante la relación entre el peso del metal que contiene y el peso total del mineral.

$$\text{Ley} = \frac{100 \times \text{Peso del metal}}{\text{Peso del mineral}} \%$$

La ley mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para que sea explotable se denomina **ley de corte**. Son muchos los factores que influyen en la ley de corte: precio de minerales asociados, facilidad para tratar el mineral (el Al pese a ser muy abundante, sólo se extrae de hidróxidos y de óxidos), forma y tamaño de la mineralización (más o menos diseminado), localización geográfica del yacimiento, etc.

Se denomina **factor de concentración** al grado de enriquecimiento que tiene que sufrir un elemento para que sea explotable. Es el cociente entre la ley de corte y el contenido medio en la corteza terrestre (clark).

Riqueza de un yacimiento al cociente entre el peso de la mena y el peso de la totalidad de sus minerales

$$\text{Riqueza} = \frac{100 \times \text{Mena}}{\text{Mena} + \text{Ganga}} \%$$

Ganga. Es el mineral que acompaña a la mena, sin utilidad práctica especial. El interés varía con el tiempo. Ej. La siderurgia del aluminio precisa de la criolita artificial como materia prima (se obtiene de la fluorita y sosa), por lo que antiguamente era ganga desechada, y es una mena importante. Las gangas más frecuentes son el cuarzo y la calcita, de menor abundancia es la baritina.

Estéril: Es todo mineral que acompaña a la mena y no es de interés económico. No es totalmente inútil. Algunas minas, requieren una fortificación de su red de galerías, y con éste fin es con el que se emplea el estéril: rellenando o constituyendo el apoyo en la fortificación de esa galería.

7.6.1 Yacimiento rentable

Los calificativos "económico", "comercial" y "rentable" suelen ser sinónimos en el lenguaje minero. Sin duda, la utilidad y la concentración de un mineral son factores importantes, pero no decisivos, para su comercialización. Los factores que concurren para que un yacimiento, en un momento determinado de la historia de la humanidad, alcance la categoría de económico son de índole muy diversa. De manera escueta citamos los siguientes:

- La concentración,
- el valor en el mercado,
- la utilidad,
- la cantidad de mineral útil,
- las circunstancias geológicas,
- la situación geográfica,
- las razones sociopolítica y/o bélicas,
- perfeccionamiento de las técnicas de extracción y/o purificación,
- aprovechamiento secundario de otras sustancias minerales acompañantes,
- competencia en los mercados nacional e internacionales.
- coste de la maquinaria y de la energía para que la máquina trabaje,
- coste de la mano de obra, financiación y otros factores.

De la relación de estos factores se desprende que llegar a la conclusión de que un yacimiento es económico necesita el asesoramiento de expertos geólogos, ingenieros de minas, financieros y de la decisión de políticos y gobernantes. Nos referimos claro está, a los grandes yacimientos que tienen repercusión en el nivel de vida de un Estado, nación, país o comarca.

La explotación individual o particular (pepitas de oro o esmeraldas) puede ser rentable para un individuo o un grupo, pero encierra poco interés social.

Para desarrollar el siguiente apartado podemos optar por dos enfoques diferentes: a) Con ayuda de claves mineralógicas describir cada uno de los minerales más importantes, por la accesibilidad a esta solución, propongo este segundo enfoque.

7.7. Clasificación y utilización de los recursos naturales:

Los recursos naturales han sido uno de los motores de desarrollo de la humanidad, por las enormes posibilidades que dan el uso de los metales: pensemos, por ejemplo, en lo que supuso la utilización del bronce y el hierro en la historia antigua.

Los minerales aprovechados actualmente los podemos clasificar en los siguientes grupos:

7.7.1. Minerales aprovechados como menas metálicas:

Los minerales aprovechables en la masa de un yacimiento forman la mena; el resto de minerales acompañantes componen la ganga. Este no es un criterio permanente ya que, por ejemplo, la fluorita (CaF_2) que acompaña a la galena y a la blenda en los filones neumatolíticos e hidrotermales, es utilizada ahora como fundente en los Altos Hornos, por lo que pasado de ser una ganga a una mena muy importante.

a) Menas de hierro:

El Fe es el metal más utilizado: representa más del 95 % del gasto total de metales. La cantidad de acero producido actualmente se utiliza como índice del desarrollo industrial de un país. Las menas que se utilizan son: Magnetita, Hematites, goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ y siderita.

La **magnetita** aparece en yacimientos de segregación magmática o de metamorfismo de contacto. La escasez y tamaño pequeño de estos yacimientos, a pesar de la excepcional riqueza en Fe de la mena (76 %), explican que la búsqueda de nuevas masas explotables se dirija a otros tipos de yacimientos (no obstante, la producción del yacimiento de Kiruna (Suecia) es enorme).

Las menas de Fe más abundantes son la **hematites** y la **goethita** procedentes de la oxidación de minerales de Fe (magnetita, biotita, etc.) La acumulación se puede producir en los continentes, formando lateritas, o en el mar, formando sedimentos de origen químico.

En climas cálidos los óxidos e hidróxidos de Fe y Al son menos solubles que el resto de los productos de meteorización, por lo cual se concentran en yacimientos residuales (**lateritas**). Pero los hidróxidos de Fe que son transportados por los ríos precipitan cerca de la desembocadura al mezclarse con agua de $\text{pH} > 7$.

La **siderita** se presenta en yacimientos de metamorfismo de contacto (generalmente en calizas) y en yacimientos sedimentarios de origen químico. En este caso parecen formarse a más profundidad que los óxidos y en ambiente más reductor.

b) Menas de Aluminio:

Por su ligereza y resistencia a la corrosión y a los esfuerzos mecánicos se ha convertido en un metal muy apreciado para las industrias del transporte y para la construcción, en las que ha ido sustituyendo al hierro. También, por ser un buen conductor de la electricidad, ha ido sustituyendo al Cu en las líneas conductoras.

Es el metal más abundante en la corteza, pero al encontrarse la mayor parte en forma de silicatos, y más escasamente en forma de hidróxidos y de óxido, las menas aprovechables son mucho menos abundantes que las de hierro. Por ello las reservas de Al para el futuro poder agotarse antes que las del hierro.

Los silicatos son poco aprovechables como menas del Al por la dificultad de separarlo de las redes silicatadas a precios rentables. Por ahora sólo se explota en grandes cantidades la **bauxita**, formada por una mezcla de **boehmita** (HAlO_2 , mena del 45 %), y **gibbsita** (H_3AlO_3 , mena de 34,6 %). La meteorización de los silicatos libera el Al, dando lateritas, que además de ocasionar minerales de Fe (goethita y oligisto) puede originar otros de Al (como los señalados).

Sólo un silicato, la nefelina ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ mena del 18,4 %), es aprovechado actualmente como mena de Al. Es de origen magmático. Muy escaso y, por tanto, no ofrece muchas posibilidades de explotación. Como el clima en el que se forman las lateritas bauxíticas es tropical y quedan en superficie expuestas a la meteorización, los yacimientos de bauxita son todos recientes, ya que su alteración se produce fácilmente por los cambios climatológicos.

Las menas futuras se buscan hoy día en las arcillas (caolinitas mena del 21 %), que por ser muy abundantes, aseguran unas reservas inagotables. El caso es que la tecnología, no suficientemente avanzada, y la disponibilidad de otras menas cuya explotación es todavía un 25 % más barata, no hace todavía beneficiables el Al de las arcillas.

c) Menas de Manganeso:

El Mn se utiliza en la producción de aceros para extraer el Azufre y el Oxígeno. Es 50 veces menos abundante que el Hierro.

El comportamiento químico del Mn es parecido al del Hierro, y a él se encuentra asociado en los silicatos de rocas magmáticas y metamórficas.

Como el caso del hierro, la meteorización lo oxida más intensamente, y al hacerse insoluble se concentra en yacimientos residuales (en climas tropicales) y en yacimientos sedimentarios, formando acumulaciones en el fondo del mar (forma nódulos). La separación de los óxidos de Fe y Mn se hace al ser más solubles los de Mn y, por tanto, son llevados más lejos (los óxidos de Fe, cerca de la costa; los de Mn el fondo oceánico). También las erupciones andesíticas submarinas están acompañadas en algunos casos de depósitos de MnO_2 .

d) Menas de Cromo:

Más del 60 % de la producción de Cr se emplea en la fabricación de aceros (entra en aleación con el Fe) y de ladrillos refractarios. El alto punto de fusión de la **cromita** ($(\text{MgFe})_2\text{CrO}_4$) explica esta utilidad.

La única mena es la cromita, que se presenta asociada a rocas ultrabásicas, como la dunita (rica en olivino) y peridotita. Los yacimientos principales son de segregación magmática, como los del macizo de Busvehl. También hay yacimientos de sedimentación mecánica, placeres.

e) Menas de Titanio:

Su producción comercial comenzó tras la Segunda Guerra Mundial. El mayor consumo se hace como SiO_2 , usado para pinturas (pigmento blanco).

En el campo de la industria espacial ha resuelto importantes problemas por su bajo peso y gran resistencia a las deformaciones mecánicas y a la corrosión.

Las menas de Ti son la **ilmenita** ($\text{TiO}_2\cdot\text{Fe}$) y el **rutilo** (TiO_2). Ambos minerales se encuentran en pequeñas cantidades en las rocas magmáticas y metamórficas. Al ser poco alterables química y mecánicamente y de alta densidad, se acumulan en placeres fluviales y marinos (arenas de playa en Kevala, India).

También la ilmenita se concentra por segregación magmática a partir de anortositas (roca básica rica en anortita) en enfriamiento.

f) Menas de magnesio:

Es el metal más ligero; además, su resistencia le hace idóneo para aleaciones resistentes a la corrosión. Es muy abundante en los silicatos (olivinos, piroxenos, anfíboles, biotita). La meteorización libera el Mg, y como es muy soluble (a diferencia del Fe y Al), es transportado en grandes cantidades al mar, cuyo agua lo contiene en disolución y donde precipita en forma de **dolomita** (CaMgCO_3), **magnesita** (MgCO_3) y **carnalita** ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2$). Estas menas son suficientes para asegurar unas reservas ilimitadas.

g) Menas de metales escasos:

Los metales escasos son aquellos cuya abundancia en la corteza es menor del 0,01 %, y entre ellos figuran algunos usados por el hombre desde la Prehistoria, como el Cu y Sn y el Au.

Otros, sin embargo, lo han sido desde principio de siglo, como el Ni, Mo, y otros incluso, como el U, desde el segundo tercio del siglo XX.

La escasez de estos metales y el alto índice de consumo de varios de ellos (Cu, Pb, Zn, Sn) pueden limitar en un futuro próximo el desarrollo industrial si no se descubren nuevos yacimientos o los avances tecnológicos permiten explotar menas de menor riqueza.

Los metales escasos rara vez forman minerales propios; en general se presentan en otros minerales abundantes, como los silicatos, sustituyendo a otros metales en la estructura atómica. Así, el Ni sustituye al Mg en el olivino.

En el caso de que la meteorización y otros procesos liberen los metales buscados de la estructura de los minerales, se podrán extraer estos metales escasos como productos secundarios de las menas de otros minerales. El caso de la plata es un buen ejemplo: ocho de los diez mayores productores empezaron a obtenerla como producto secundario de minas de Pb, Zn o Cu.

Se han agrupado los metales escasos en tres grupos que se presentan en yacimientos característicos: Los que se presentan generalmente como sulfuros: Cu, Pb, Zn, Ni, Mo, Ag, As, Sb, Bi, Cd, Co y Hg. Como metales nativos: Au, Pt, etc. Como óxidos o Silicatos: V, Ta, Sn, Be y U. Los sulfuros forman generalmente yacimientos de tipo hidrotermal.

Los metales nativos forman yacimientos sedimentarios (placeres), debido a su inalterabilidad y alta densidad. Proceden estas concentraciones de yacimientos de segregación magmática (caso del Pt, asociado a cromita en rocas básicas o ultrabásicas) o de filones hidrotermales ácidos. Los otros metales escasos, que se presentan como óxidos o silicatos, suelen aparecer en filones pegmatíticos o en zonas de metamorfismo de contacto.

7.7.2. Minerales aprovechables para la industria química y como fertilizantes:

Este tipo de minerales son utilizados sin que se separen de ellos los metales, y siendo algunos aprovechados por su contenido en elementos no metálicos, como los fosfatos o nitratos, y otros por los usos del propio mineral, como la sal común.

Entre los usados por la industria química destacamos la sal común o halita (además de usarla como condimento, se usa para fabricar Cl, jabones, detergentes, etc.) y diversas menas de azufre. El abastecimiento de sal común está asegurado para muchos años por evaporación de las aguas marinas.

Los yacimientos salinos de grandes espesores deben haberse formado en mares profundos, ya que, de otra manera la cuenca quedaría llena en poco tiempo, y además es necesario una relación evaporación/alimentación de agua que sólo se da en mares de escasa circulación y clima cálido. El problema de la explotación de los yacimientos salinos es la profundidad a que se encuentran la mayoría, si bien su escasa densidad (2,2), comparada con las rocas sedimentarias asociadas (2,5), origina el ascenso de domos o diapiros salinos.

Fertilizantes: De los elementos que las plantas terrestres precisan para su actividad vital, el C lo toman de la atmósfera, pero otros, como el N, P, K, S, pueden no estar contenidos en el suelo en proporción suficiente, por diversas causas, y hay que suministrarlos en forma de abonos para asegurar su crecimiento. El N se suministra en forma de nitratos, de los cuales una parte cada vez más pequeña procede del KNO_3 y NaNO_3 (llamado nitrato de Chile), pero la escasez El P forma parte del apatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{FCIOH})$], presente en gran número de rocas, aunque en pequeña proporción. Poco soluble; el que absorben las plantas pasa después a los huesos de los vertebrados, siendo por último devuelto al suelo. El déficit de P en el suelo debe ser suplido con abonos. Las concentraciones de apatito se dan en yacimientos sedimentarios (parece que se forman de restos de vertebrados).

El K se suministra en forma de cloruros y sales complejas que aparecen en acimientos evaporíticos en climas de extrema aridez.

El S se suministra como sulfato amónico y otros abonos, las materias primas aprovechables para su fabricación son: Sulfato cálcico, S nativo (de solfataras) y la pirita.

7.7.3. Minerales aprovechados para otros usos:

En este grupo incluimos dos minerales : Fluorita y Diamante.

La **fluorita** es utilizada como fundente en los Altos Hornos de acero. El Flúor rebaja el punto de fusión del Fe. Este mineral aparece en filones hidrotermales.

El **diamante** es utilizado desde antiguo como piedra preciosa, pero hoy día sólo el 20 % de los obtenidos se pueden tallar para joyería (si bien representan el 65 % del valor económico total). El 80 % restante se emplea como abrasivo, perforadores de sondeo, etc. Los yacimientos diamantíferos son chimeneas kimberlíticas (rocas ultrabásicas muy escasas), y los placeres sedimentarios, la dureza de estos minerales y su densidad favorecen su acumulación en estos yacimientos. Las necesidades industriales de este mineral y su escasez ha impulsado su desarrollo tecnológico hasta permitir su fabricación industrial, sometiendo el grafito a enormes presiones.

7.7.4. La producción minera y el medio ambiente

La producción minera y la economía mundial evolucionan en paralelo. Pero además de los grandes ciclos del desarrollo económico, otras variables pueden influir en la explotación de determinados minerales.

Por ejemplo, el uso generalizado del mercurio en pinturas, desinfectantes, fertilizantes y electrónica ha provocado la concentración de este metal en cantidades peligrosas en los mares, y su entrada, a través de peces, en la cadena alimentaria humana. Como consecuencia de varios accidentes graves, el mercurio ha sido sustituido paulatinamente en algunas de sus aplicaciones: esto explica el descenso de su producción en España en la última década.

Otros datos de la negativa situación de la producción minera se explica también por causas medioambientales. En este caso, a desulfuración del petróleo para evitar la contaminación por óxidos de azufre ha producido enormes cantidades de éste, lo que ha hecho caer en picado su precio.

En otros casos, los descensos se deben simplemente al agotamiento progresivo del yacimientos que en buena parte se explotan desde la época romana, y a la competencia de la minería del cer Mundo, con mano de obra mucho más barata.

7.8. Rocas de interés económico.

A continuación se incluye una clasificación de las rocas industriales en las que se contempla la industria que se emplea y los productos que se elaboran a partir de ellas. Esta clasificación se basa en el **Atlas e Inventario de rocas industriales de España del Ministerio de Industria**.

ROCAS (TIPOS)	PRODUCTOS OBTENIDOS	INDUSTRIA EN QUE SE USA
Arenisca, caliza, andesita, basalto, granito, ofita, pórfido, traquita, serpentina	Piedras de construcción	CONSTRUCCIÓN
Arenisca, caliza, dolomía, cuarcita, granito, mármol, pizarra, serpentina, andesita.	Rocas ornamentales	CONSTRUCCIÓN
Arenisca, caliza, dolomía, marga, yeso, pizarra, pumita	Cemento y derivados	AGLOMERANTES
Caliza, dolomía, marga, mármol, pumita	Cales	
Yeso	Yesos	
Grava, arenisca, caliza, cuarcita, mármol, pizarra, andesita, basalto, ofita, pórfido, pumita, traquita y granito	Áridos naturales y artificiales	ÁRIDOS
Arena, caliza, sienita	Vidrios	VIDRIO

Arena, caliza, sienita	Loza y porcelanas	CERÁMICA
Arena, arena, cuarcita, pumita, sienita	Ladrillería	
Arcilla, arena, arenisca, caliza, grava y cuarcita	Refractarios	
Arcilla, yeso	Aislantes	VARIAS
Caliza, dolomía, dunita	Fundentes	
Arena, caliza, mármol, basalto, turba	Correctivos	
Caliza	Aditivos y cargas	
Arena, arenisca, caliza, dolomía, cuarcita y basalto	Abrasivos	
Arcilla y arena	Arenas de moldeo	

Las **rocas industriales**, son todas aquellas sustancias minerales utilizadas en procesos industriales, directamente o mediante una preparación adecuada, en función de sus propiedades físicas y químicas, y no en cuanto a la energía o a las sustancias que pudieran extraerse de las mismas. La explotación de estas rocas se hace en canteras, aprovechando las líneas de diaclasas o fracturas cuando son rocas masivas.

La industria de la construcción, utiliza en todas sus vertientes, una gran cantidad de materiales de naturaleza diversa, en su mayoría de origen sedimentario, que no pueden ser consideradas como yacimientos puesto que no representan concentraciones "anómalas". Se trata de materiales muy comunes y abundantes (arcillas, limos y arenas), que en proporciones adecuadas sirven para la fabricación de los numerosos componentes cerámicos de la construcción (ladrillos, etc.), o las arenas cuarzosas utilizadas en la fabricación de vidrio.

Los **vidrios** se fabrican fundiendo minerales y rocas, ricos en cuarzo, en hornos y luego enfriando rápidamente el fundido para impedir la formación de núcleos de cristalización. Las arcillas se utilizan en cerámica, tanto en ladrillos normales (las más corrientes), como en ladrillos refractarios (las pobres en carbonatos) o en la fabricación de porcelanas (caolín).

El **yeso** se extrae de la roca del mismo nombre por calentamiento o calcinación; la cal es un óxido de calcio obtenido de la calcinación de las calizas, en parte ha sido reemplazado por el cemento.

Los **áridos** se obtienen por trituración, lavado y clasificación por tamaños. La mayoría de rocas empleadas como áridos son calizas y dolomías (2/3 del total en España). Arenas y gravas de ríos y playas es el segundo material usado como áridos. Sus disponibilidades y reservas son cuantiosas y de fácil acceso. Sin embargo su explotación suele dejar tras de sí parajes desolados e irreversibles para cualquier uso, aunque recientemente se avanza en el sentido de que cada explotación ha de ir seguida de una recuperación del paisaje del lugar.

Como **piedras ornamentales** se utilizan las calizas travertínicas de cantera, mal llamadas mármoles, y algunas areniscas utilizadas en los edificios públicos desde antiguo. También se utilizan rocas metamórficas (mármoles, pizarras, esquistos), e ígneas (granito), una vez cortadas y pulidas.

Entre los **aglomerantes**, el de mayor importancia es el cemento. El que actualmente se emplea se basa en la mezcla de rocas que se expresa en la figura y su mezcla se patentó en el siglo XIX como cemento portland.

El **hormigón** se obtiene de una mezcla de cemento en cantidades no superiores al 15 %, con grava y arena, empleándose doble cantidad de grava que de arena. A la mezcla se le añade agua para que fragüe.

Entre las industrias diversas destacamos los **fundentes**, que se emplean en la obtención de acero en los altos hornos.

En la industria química se usan: **Fosfatos** para fertilizantes, se presentan en estratos y se extraen en yacimientos a cielo abierto. Con las **evaporitas** (compuestas de Halita, Silvina y Carnalita) se fabrican fertilizantes potásicos, productos químicos básicos, explosivos, pinturas, fármacos, etc.

Las **bauxitas** además de menas del aluminio se utilizan también mezcladas con caliza para cementos de fraguado rápido.

Las **dolomías** se emplean como materia prima para pinturas, aislante térmico, y en la fabricación de cementos transparentes.

7.9. Principales recursos minerales y rocas de la Región de Murcia

- Mineralizaciones de Azufre embolsado dentro de caliza margosa, en la Serrata de Lorca; también aparece Celestina.
- Mineralización de blenda-pirita-galena en Mazarrón y Cartagena-La Unión. También aparece Calcopirita, Arsenopirita, Magnetita y óxidos de alteración (Malaquita y Azurita).
- Mineralización de Bauxita en la Zarzilla de Totana, constituye el único yacimiento de las Béticas.
- Mineralización de Hematites en La Celia (Jumilla), Santomera (entre yacimientos de Ofitas) y Puerto de la Cadena. El La Celia aparece también Apatito (Esparraguina) incrustado en Jumillita.
- En Pinoso (Alicante, el cerro de la Sal es un diapiro de Halita del Triásico.
- Mineralización de yeso, halita, aragonito y cuarzo, en el cerro de la Rosa.
- Mineralización de livino en el allante. Cerca de los Nietos hay Anfíboles asbestiformes y Epidota.
- Mineralización de Prehnita, Granates y Magnetita, en Caravaca y Cehegín.
- En todos los terrenos del Triásico (Koiper) hay mucho yeso.

Rocas de la región de Murcia

ÍGNEAS:

- Dacitas. Junto con inclusiones de Gneis en Mazarrón;
- Basaltos. Con inclusiones de olivino en el Tallante;
- Ofitas. En zonas internas (Sur) y externas (Norte) de la región; Andesitas. Erosionadas en bolas, en las islas del Mar Menor;
- Fortunita. Se trata de una roca básica con abundantes elementos alcalinos, se trata de rocas anómalas o Lamprósticas.

SEDIMENTARIAS:

Dominan en la zona Norte (Calizas y Dolomías del subbético). Caravaca y Cehegín. Aunque en las zonas internas de la Cordilleras (Sur de la Región) predominan las rocas metamórficas en distintos grados, al surgir los plegamientos quedaron zonas deprimidas que fueron invadidas por el mar dando zonas de sedimentación neógena; forman las Calizas tableadas azules, se trata de calizas recrystalizadas con poco metamorfismo. Calizas rojas, a veces con Anmonites, en Cehegín.

METAMÓRFICAS:

- Mármol. Contiene mica y algo de magnetita, en cantera abandonada en el Cabezo Gordo (San Javier y Balsicas).
- Filitas y Esquistos, que se erosionan en lajas, en Cabo de Palos.
- Gneis. Incluidos en los basaltos del Tallante