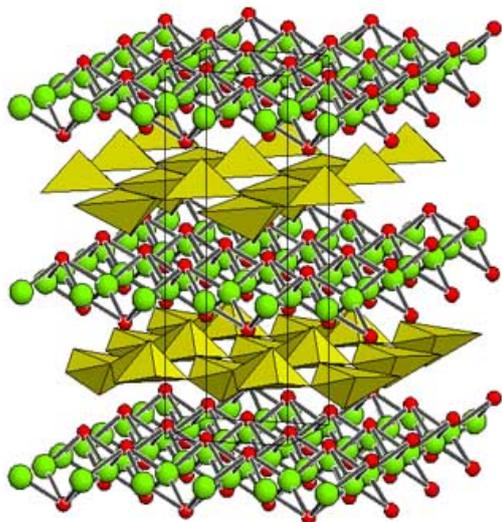


## **BLOQUE 2. LA MATERIA MINERAL.**

### **2.1- CRISTALOGRAFÍA: ESTRUCTURA DE LA MATERIA CRISTALINA.**

#### **2.1.1- El estado sólido.**

Aunque la materia en el universo adopta preferentemente el estado gaseoso, en Geología tiene mayor interés el estado sólido ya que la litosfera está constituida por rocas y éstas se componen de minerales, que son en su mayoría sólidos cristalinos.



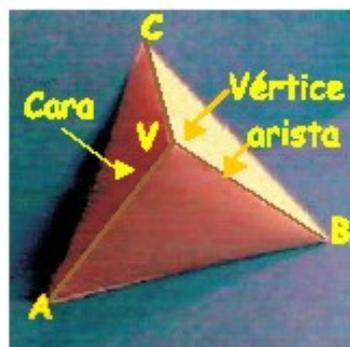
El estado sólido se caracteriza por la fuerte unión entre sus partículas constituyentes, que ocupan posiciones más o menos fijas. Si estas posiciones están geoméricamente ordenadas hablamos de materia cristalina. Si por el contrario están desordenadas, hablamos de materia amorfa.

#### **2.1.2- Estructura interna de la materia cristalina.**

##### **a) Cristales.**

En los sólidos los enlaces entre átomos o moléculas suelen encontrarse ordenados en las tres direcciones del espacio, constituyendo la materia cristalina. Esta propiedad intuida por algunos naturalistas desde el siglo XVIII, no tuvo confirmación hasta comienzos del siglo XX cuando Von Laüe demostró, mediante radiografías con rayos X, que los cristales estaban formados por el apilamiento de planos de átomos.

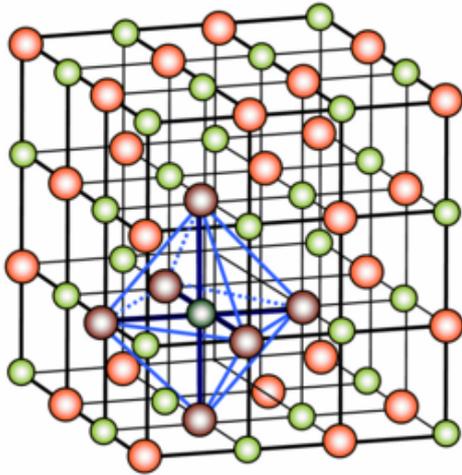
Se define cristal como “porción de materia cristalina limitada exteriormente por caras planas, aristas y vértices”. Por extensión también se define como “cualquier sólido con estructura interna ordenada”.



Los puntos A,B,C y V son vértices del tetraedro.  
Las líneas VA, VB, VC y CA son las aristas.  
Los planos VAB, VBC, BCA, y ABC son las caras del tetraedro.

Los cristales pueden ser de origen natural o artificial, y de composición inorgánica u orgánica. La ordenación interna es la clave de sus propiedades, de

las que depende su aspecto y su respuesta ante los procesos naturales o tecnológicos. A su vez, dichas propiedades son consecuencia de la relación entre diferentes variables como el tamaño de las partículas y su carga, los tipos de enlaces químicos, etc.



Los cristales visibles al ojo humano reciben el nombre de fenocristales. Los cristales sólo visibles a microscopio se denominan microcristales.

### b) Teoría reticular.

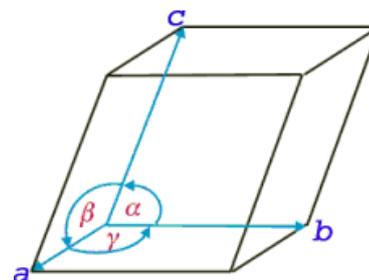
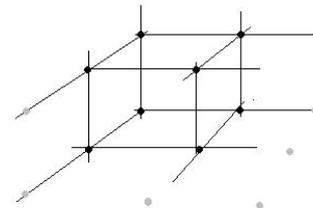
La forma poliédrica de algunos cristales es consecuencia de su estructura interna. Las "radiografías" elaboradas de los cristales permiten afirmar que la materia cristalina constituye un andamiaje tridimensional, en el que las distancias entre las partículas y los ángulos que forman estos segmentos, se mantienen constantes.

Para estudiar las redes cristalinas se establecen unos ejes de coordenadas que coinciden con filas fundamentales. Estos deben cumplir una serie de características:

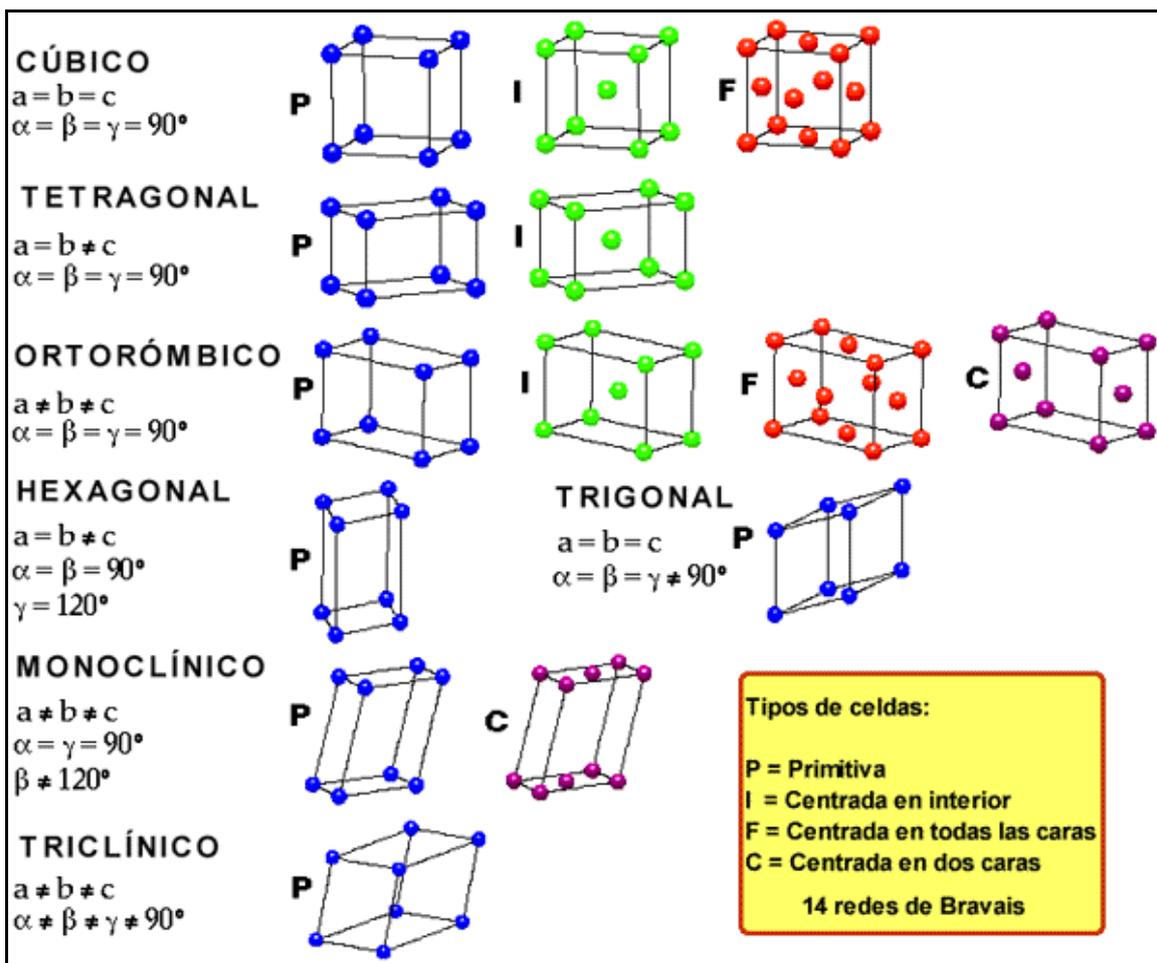
-Los ejes coinciden con filas de partículas de la red.

-Los tres ejes coinciden con las filas de mayor densidad lineal (contienen nudos separados por el menor espacio posible)

Establecidos los ejes de coordenadas, su origen se hace coincidir con un nudo de la red y, a partir de él, se define un poliedro cuyas aristas son los ejes cristalográficos y los vértices de cada arista coinciden con dos nudos consecutivos. Este poliedro se denomina **celdilla unidad**.



Así pues, una red cristalina puede considerarse como el apilamiento de millones de celdillas elementales. En la naturaleza sólo existen 14 tipos



distintos de celdillas elementales: las celdillas de Bravais.

### 2.1.3- Propiedades de la materia cristalina.

La repetición indefinida de un motivo estructural que se repite, tiene una serie de consecuencias.

- Homogeneidad: el valor de una medida en una porción de un cristal se mantiene en cualquier porción de él.

- Anisotropía: Es una característica según la cual, determinadas propiedades de un cristal dependen de la orientación que se considere. Así, la conductividad eléctrica,

calorífica, dilatación térmica, velocidad de propagación de la luz, etc., son muy diferentes según la dirección que se tome en cuenta. En el caso de la propagación de la luz en el interior de un cristal de cuarzo, por ejemplo, su velocidad dependerá de la dirección que los rayos sigan en su interior. Estructuralmente, la distancia entre los nudos vecinos de una red cristalina no es constante, y dependen de la dirección, de ahí que dependiendo de la dirección varíen las propiedades del cristal. (Los cristales del sistema cúbico pueden no presentar anisotropía en algunas propiedades, y por tanto comportarse como sólidos amorfos)

- **Simetría:** los elementos morfológicos que forman el cristal (caras, aristas y vértices) se repiten según unos ejes y planos imaginarios denominados elementos de simetría. Los sistemas cristalinos se caracterizan por sus diferentes grados de simetría, que oscilan entre la máxima del sistema cúbico, a la mínima del triclinico.

Se dice que dos figuras son simétricas entre sí cuando ambas se pueden hacer coincidir. Para realizar las coincidencias se utilizan las denominadas operaciones de simetría que son: reflexión, rotación o giro e inversión.

#### Elementos de simetría de un cristal.

La materia cristalina tiene simetría debido a la ordenación de sus átomos y repetición de la celdilla elemental.

Los operadores mediante los que se pueden definir estos parámetros son el centro, eje y plano de simetría.

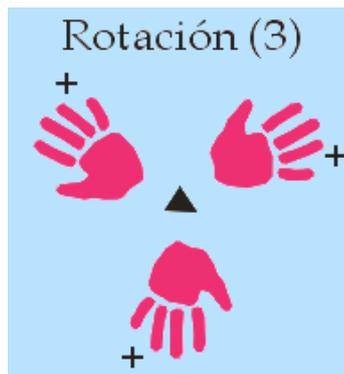
#### **Centro de simetría**

El centro de simetría es el punto ideal situado en el interior del cristal, que divide a los ejes cristalográficos que pasan por él en dos partes iguales.

#### **Eje de simetría**

El eje de simetría es la recta que pasa por el centro de simetría, y que al girar el cristal sobre él 360° se puede observar el

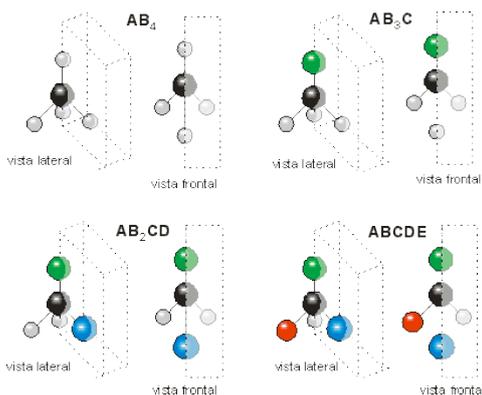
mismo aspecto un número de veces 2, 3, 4 o 6. El orden de los ejes viene determinado por el número de veces que se repite una posición. Así, se definen como binarios cuando se repiten 2 veces; ternarios, cuando se repite 3 veces; cuaternarios, 4 veces; y senarios, 6 veces.



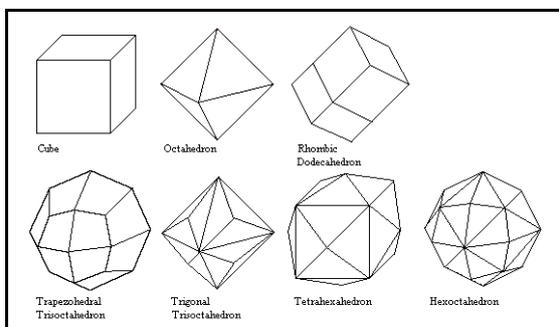
#### **Plano de simetría**

El plano de simetría es el plano ideal que divide el cristal en dos partes iguales y simétricas. Los tres ejes cristalográficos que pasan por el centro de simetría, dividen al cristal en ocho partes (octantes), coincidentes con los planos de simetría del cristal.

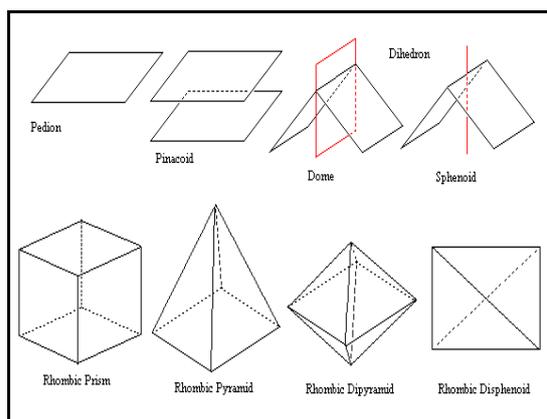




Cuando un poliedro puede reconstruirse totalmente a partir de una cara por aplicación sucesiva de los elementos de simetría, se dice que es una forma cerrada.



Pero a menudo esto no es posible, se habla entonces de que los cristales constan de dos o más formas abiertas.



Los cristales que existen en la naturaleza pueden agruparse en siete tipos (los sistemas cristalinos) de acuerdo con las

longitudes de los ejes cristalográficos y de los ángulos que forman entre sí.

### 2.1.4- Procesos de cristalización y génesis cristalina.

La génesis cristalina tiene su origen en los siguientes mecanismos básicos:

-Solidificación por enfriamiento de un fundido, como sucede en una cámara magmática en la que desciende la temperatura.

-Precipitación química a partir de una disolución como sucede en el mar cuando se evapora el agua y cristalizan sales, o precipitación bioquímica inducida por la actividad de seres vivos como las conchas de los moluscos.

- Alteración o meteorización por acción del agua, el oxígeno o el dióxido de carbono sobre los minerales a la intemperie, proceso que puede dar lugar a minerales nuevos con estructuras diferentes.

- Sublimación por enfriamiento súbito de un gas, como sucede con la cristalización del azufre en las fumarolas volcánicas.

- Recristalización. Cuando en un cristal algunos iones son sustituidos por otros sin que se abandone el estado sólido y como consecuencia aparecen minerales nuevos. Un ejemplo de recristalización sería la transformación

de la calcita en dolomita durante la diagénesis.

En condiciones adecuadas de presión, temperatura y saturación se produce la cristalización a partir de grupos de átomos o impurezas que actúan como núcleo de crecimiento del cristal. En ausencia de partículas el proceso se inicia en condiciones de sobresaturación.

Sobre los núcleos se van añadiendo, de forma ordenada y según capas paralelas, los átomos que constituyen la sustancia. El crecimiento es posible porque las capas externas que se van creando, nunca tienen completas sus cargas.

Algunos minerales están formados por microcristales, que solo son visibles a microscopio y otros por fenocristales, visibles a simple vista. Dichas características dependen de otras condiciones: espacio, tiempo y reposo.

Cuanto más lento y más largo sea el proceso de cristalización, los cristales podrán adquirir mayor tamaño, siempre que tengan espacio para su formación. En el otro extremo, un enfriamiento demasiado rápido, conducir a la formación de un vidrio volcánico, sin estructura cristalina.

Por falta de espacio, los cristales adquieren una forma externa irregular, pero cuando crecen libremente, su estructura interna se manifiesta también en la forma externa poliédrica.

El reposo es también una condición para que los cristales alcancen un mayor tamaño frente a los que se forman en ambientes agitados.

#### **2.1.5- Defectos cristalinos: el cristal real.**

La cristalización nunca es perfecta. Como en cualquier proceso natural se producen imperfecciones en el crecimiento. Estas imperfecciones reciben el nombre de defectos cristalinos. Son las responsables de variaciones en el color o la forma de los cristales. Los defectos cristalinos se denominan:

- **Vacancias:** Se producen por la ausencia en la red de un elemento. Las vacancias, al igual que otros defectos, pueden desplazarse libremente a lo largo de la red.

- **Átomos intersticiales:** Inclusión en la red de un átomo fuera de las posiciones reticulares. Con frecuencia este defecto se presenta unido a una vacancia, pues la formación de una vacante favorece la aparición de un átomo intersticial.

- **Sustituciones:** Entrada en la red de un átomo diferente, pero de similar radio iónico que el que la compone. Pueden

dar lugar a la aparición de **series isomorfas** (cuando pueden darse todas las sustituciones posibles, sin alterar la estructura de la red).

- **Dislocaciones:** Aparición de nuevas filas de elementos cuando en el plano anterior no existían. Una dislocación de este tipo son las **dislocaciones helicoidales**, que permiten un crecimiento rápido de una cara, pues esta nunca se acaba.

-**Destrucciones locales** de la red debido a inclusiones de elementos radiactivos que se han desintegrado.

## **2.2- LOS MINERALES.**

La mineralogía es la disciplina geológica que tiene por objeto el estudio de los minerales y de todas sus características: forma externa, comportamiento físico, composición química, génesis, así como su prospección y su explotación.

### **2.2.1- Conceptos básicos en mineralogía.**

#### Mineral.

Un mineral es una sustancia sólida, inorgánica, natural, homogénea, de composición química y estructura interna definidas, y estable dentro de unos determinados límites de presión y temperatura.

En ocasiones, se incluyen sustancias líquidas como el mercurio.

En ocasiones se incluyen también sustancias no cristalinas como el ópalo.

También se usa de forma incorrecta el término "mineral" para referirse a "sal mineral"

#### Polimorfismo.

Una misma sustancia puede cristalizar bajo distintas condiciones de presión y temperatura. Siendo éstas las que determinan la estabilidad de cada mineral, se podrán obtener distintas estructuras cristalinas.

En general, a mayor temperatura y menor presión, aparecerán estructuras más abiertas; y a menor temperatura y mayor presión, las estructuras resultantes serán más compactas.

Son ejemplos de minerales polimorfos:

C – Grafito, diamante.

CaCO<sub>3</sub> -Aragonito, calcita.

SiO<sub>2</sub> - Cuarzo, cristobalita, tridimita, cohesita, etc.

KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Microclima, sanidina, ortosa (feldespatos potásicos)

Cuando un mineral ya está formado, pueden variar las condiciones termodinámicas. Entonces se produciría un cambio polimorfo. En ocasiones, estos cambios son extremadamente lentos. Se habla entonces de cambios "irreversibles" (ej: grafito- diamante)

#### Isomorfismo.



Por su parte, las sulfosales son minerales compuestos de plomo, plata y cobre combinados con azufre y algún otro mineral como el arsénico, bismuto o antimonio. Un ejemplo de sulfosal es la pirargirita

Incluido compuestos de selenio (Selenide), arsenuros (Arsenide), telururos (Telluride), antimonuros (Antimonide) y compuestos de bismuto (Bismutide). Los sulfuros se distinguen con base en su proporción metal. Ejemplos son galena PbS, esfalerita ZnS, piritita FeS<sub>2</sub>, calcopirita CuFeS<sub>2</sub>, argentita Ag<sub>2</sub>S, Löllingit FeAs<sub>2</sub>.

### **III- Haluros.**

Los halogenuros o haluros, son compuestos que resultan de la combinación de un halógeno (cloro, flúor, bromo o yodo), con otro elemento. Un ejemplo común de halogenuro es la halita (sal de gema)

Los aniones característicos son los halógenos F, Cl, Br, I, los cuales están combinados con cationes relativamente grandes de poca valencia, p.ej. halita NaCl, silvina KCl, fluorita CaF<sub>2</sub>.

### **IV- Óxidos e Hidróxidos.**

Los óxidos e hidróxidos son el producto de la combinación del oxígeno con un elemento. En realidad, casi todos los elementos forman óxidos, que se dividen según sus propiedades en óxidos básicos (metálicos) y ácidos (formados por combinación del oxígeno con un elemento no metálico)

Los óxidos son compuestos de metales con oxígeno como anión. P.ej. cuprita Cu<sub>2</sub>O, corindón Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hematites Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, rutilo TiO<sub>2</sub>, magnetita Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Los hidróxidos están caracterizados por iones de hidroxido (OH<sup>-</sup>) o moléculas de H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>, p.ej. limonita FeOOH: goethita \*-FeOOH, lepidocrocita \*-FeOOH.

### **V- Carbonatos nitratos y boratos.**

Los boratos están constituidos por sales minerales o ésteres del ácido bórico; se trata de minerales muy diferentes en apariencia y propiedades físicas.

Los nitratos son sales que derivan del ácido nítrico; se trata de un pequeño grupo de minerales difíciles de hallar en la naturaleza en formaciones concentradas, y que poseen características de escasa dureza y alta solubilidad; se distingue la nitratina o nitrato sódico (o nitrato de Chile o Caliche, llamado así por el gran yacimiento existente en el desierto de

Atacama al Norte de ese país), y el salitre o nitrato potásico. Estas sales se utilizan frecuentemente en la fabricación de explosivos, y especialmente como abonos por su riqueza en nitrógeno.

Los carbonatos son sales derivadas de la combinación del ácido carbónico y un metal. Estos compuestos están muy difundidos como minerales en la naturaleza. Ejemplo de carbonatos son la azurita y malaquita (carbonatos hidratados de cobre), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), aragonito ( $\text{CaCO}_3$ ) y Dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

## **VI- Sulfatos, Wolframatos, Molibdatos y Cromatos.**

Los sulfatos son sales o ésteres del ácido sulfúrico, por lo general solubles en agua, excepto los sulfatos de plata, mercurio, calcio, bario, plomo y estroncio. Se trata de minerales de origen diverso, inestables, de aspecto variable (casi siempre no metálicos) y generalmente de escasa dureza. Ejemplo de sulfato es la Baritina ( $\text{BaSO}_4$ ), el Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la Tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

Los cromatos son sales o ésteres del ácido crómico. Se presenta generalmente en forma de minerales de colores amarillentos. Las sales alcalinas son utilizadas como reactivos analíticos y oxidantes.

Los wolframatos son elemento poco abundantes en la naturaleza. Se trata de un metal duro, denso y de brillo plateado, que se encuentra formando parte de la wolframita. Tiene utilidad en la formación de aleaciones y, dado su gran dureza, como sustituto del diamante. Una utilidad muy común por su elevado punto de fusión, es la fabricación de filamentos para lámparas incandescentes (tungsteno)

Los molibdatos (como la molibdenita) son minerales que se presentan en la naturaleza en forma de sulfuro. Tiene utilidad en la mejora de la resistencia y ductilidad de algunos aceros y aleaciones, y en la construcción de determinados componentes electrónicos.

## VII- Fosfatos, Arseniados y Vanadatos.

En los fosfatos el complejo aniónico  $(\text{PO}_4)^{3-}$  es el complejo principal, como en el apatito  $\text{Ca}_5[(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})/\text{PO}_4]_3$  los arseniados contienen  $(\text{AsO}_4)^{3-}$  y los vanadatos contienen  $(\text{VO}_4)^{3-}$  como complejo aniónico.

Los fosfatos sales o ésteres del ácido fosfórico, arsénico y vanadio. Son solubles en los ácidos minerales, excepto los fosfatos neutros de metales alcalinos, que son solubles en agua.

La utilidad fundamental de los fosfatos es la de fertilizante, aunque algunos de ellos también son empleados en la industria textil para eliminar la dureza del agua. Ejemplo de fosfatos son el apatito y la piromorfita.

## VIII- Silicatos.

Los silicatos son sales de ácido silícico. Se trata de los compuestos más frecuentes y fundamentales de la litosfera. Son parte importante de numerosas rocas y minerales (integran el 95% de la corteza terrestre), y se hallan exclusivamente en forma de silicio y oxígeno (sílice), o en combinación con otros elementos. Salvo los alcalinos, los silicatos son insolubles, y gran parte de ellos, salvo el fluorhídrico, son inatacables por los ácidos.

Minerales que se incluyen dentro de los silicatos son el feldespato, mica, cuarzo, anfíbol, piroxeno y zeolita. Los silicatos más importantes son los de sodio y potasio (vidrios solubles), de magnesio (como el talco), de calcio (que integran el vidrio y el cristal), y de aluminio (como el caolín o la arcilla)

Es el grupo más abundante de los minerales formadores de rocas donde el anión está formado por grupos silicatos del tipo  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ .

### La estructura de los silicatos.

Más del 90% de los minerales que forman las rocas son silicatos, compuestos de silicio y oxígeno y uno o más iones metálicos.

Los principios estructurales de los silicatos son los siguientes:

a) Cada uno de los silicatos tiene como compuesto básico un ion complejo de forma tetraédrica. Este tetraedro consiste en una combinación de un ion de silicio con un radio de  $0.42\text{Å}$ , rodeado por 4 iones de oxígeno con un radio de  $1.32\text{Å}$  tan estrechamente como es posible geoméricamente. Los iones de oxígeno se encuentran en las esquinas del tetraedro y

aportan al tetraedro una carga eléctrica de -8 y el ion de silicio contribuye con +4. Así, el tetraedro puede considerarse como un anión complejo con una carga neta de -4. Su símbolo es  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . Se lo conoce como anión silicato.

b) La unidad básica de la estructura de los silicatos es el tetraedro de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . Se distinguen algunos pocos tipos estructurales de los silicatos: los neso-, soro-, ciclo-, ino y tectosilicatos.

c) El catión  $\text{Al}^{3+}$  puede ser rodeado por 4 o 6 átomos de oxígeno y tiene un diámetro iónico muy similar a  $\text{Si}^{4+}$  ( $\text{Si}^{4+}$ : 0.42Å,  $\text{Al}^{3+}$ : 0.51Å). Por esto reemplaza al  $\text{Si}^{4+}$  en el centro del tetraedro por ejemplo en la moscovita  $\text{KAl}[\text{6}]\text{2}[(\text{OH})\text{2}/\text{Si3Al}[\text{4}]\text{O11}]$  o se ubica en el centro de un octaedro como los cationes  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$  por ejemplo en el piroxeno de sodio Jadeita  $\text{NaAl}[\text{6}]\text{Si}_2\text{O}_6$ .

### Tipos de silicatos

-**Nesosilicatos** formados de tetraedros independientes, que alternan con iones metálicos positivos como p.ej. en el olivino:  $(\text{FeMg})_2\text{SiO}_4$

Además el oxígeno del anión silicato  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  simultáneamente puede pertenecer a 2 diferentes tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . De tal manera se forman aparte de los tetraedros independientes otras unidades tetraédricas.

- **Sorosilicatos** formados de pares de tetraedros:  $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ , por ejemplo epidota.

- **Ciclosilicatos** formados por anillos de tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ :  $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$ ,  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$ ,  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ , p.ej. berilo  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$

- **Inosilicatos** formados por cadenas simples o cadenas dobles de tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ :

-cadenas simples por ejemplo piroxenos:

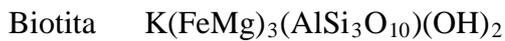
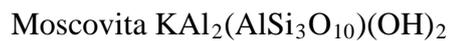
Augita  $\text{Ca}(\text{FeMg})(\text{SiO}_3)_2$

Hiperstena  $(\text{FeMg})\text{SiO}_3$

-cadenas dobles por ejemplo anfíboles.

Hornblenda  $\text{CaNa}(\text{MgFeAl})_5(\text{AlSi})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- **Filosilicatos** formados por placas de tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  por ejemplo:



Más los filosilicatos del grupo de la arcilla (caolín, illita, montmorillonita, clorita, etc)

- **Tectosilicatos** con estructuras tetraédricas tridimensionales, por ejemplo:

