

# GEOLOGÍA

Juan Manuel Velasco  
Vicente M. Alfageme  
María Esperanza Cabrera  
Ángel Corrochano  
María Piedad Franco  
Margarita Gil  
Juan Carlos Gonzalo  
Emiliano Jiménez  
María Eugenia Mulas  
Rosa María Reguilón  
Raimundo Rodríguez  
Carlos Salamanca

Ciencias de la Naturaleza  
y de la Salud



**EDITEX**

**2B**  
Bachillerato

**Juan Manuel Velasco Santos**

Coordinador

*Profesor de Educación Secundaria*

**Vicente M. Alfageme Benítez-Cano**

*Profesor de Educación Secundaria*

**María Esperanza Cabrera López**

*Profesora de Educación Secundaria*

**Ángel Corrochano Sánchez**

*Profesor de Universidad (Estratigrafía)*

**María Piedad Franco González**

*Profesora de Universidad (Petrología y Geoquímica)*

**Margarita Gil Agero**

*Profesora de Educación Secundaria*

**Juan Carlos Gonzalo Corral**

*Profesor de Universidad (Petrología y Geoquímica)*

**Emiliano Jiménez Fuentes**

*Profesor de Universidad (Cristalografía y Mineralogía)*

**María Eugenia Mulas Alonso**

*Profesora de Educación Secundaria*

**Rosa María Reguilón Bragado**

*Profesora de Universidad (Cristalografía y Mineralogía)*

**Raimundo Rodríguez González**

*Profesor de Educación Secundaria*

**Carlos Salamanca Núñez**

*Profesor de Educación Secundaria*

# GEOLOGÍA

**2° Bachillerato**  
**Ciencias de la Naturaleza**  
**y de la Salud**



**EDITEX**



# CRISTALES Y MINERALES

## CONTENIDOS CONCEPTUALES

1. ¿Qué es un mineral?
2. Propiedades de los minerales
3. Clasificación mineral

La importancia de los minerales data de los tiempos remotos en los que el hombre supo encontrar aplicaciones a los mismos. Al principio se utilizaban tal como se encontraban en la naturaleza: arcilla para ladrillos; pedernal y cuarzo para armas o herramientas; oro, plata y cobre nativos para adornos y utensilios; etc. Actualmente utilizamos los minerales en innumerables procesos: fabricación de ordenadores, construcción de rascacielos, etc. Si bien aún hoy, ciertos minerales como el talco, el asbesto, y el azufre se utilizan tal y como son extraídos, la mayoría son sometidos a procesos industriales.

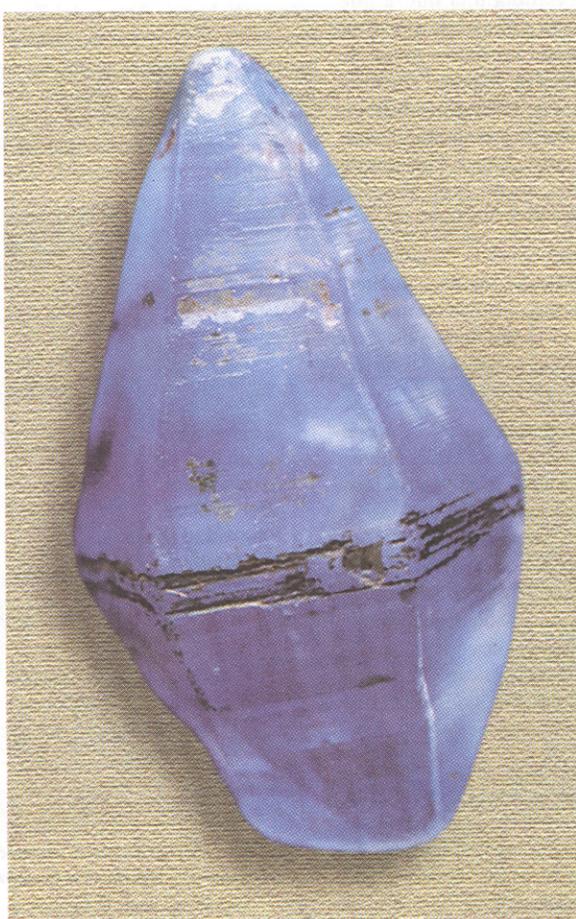
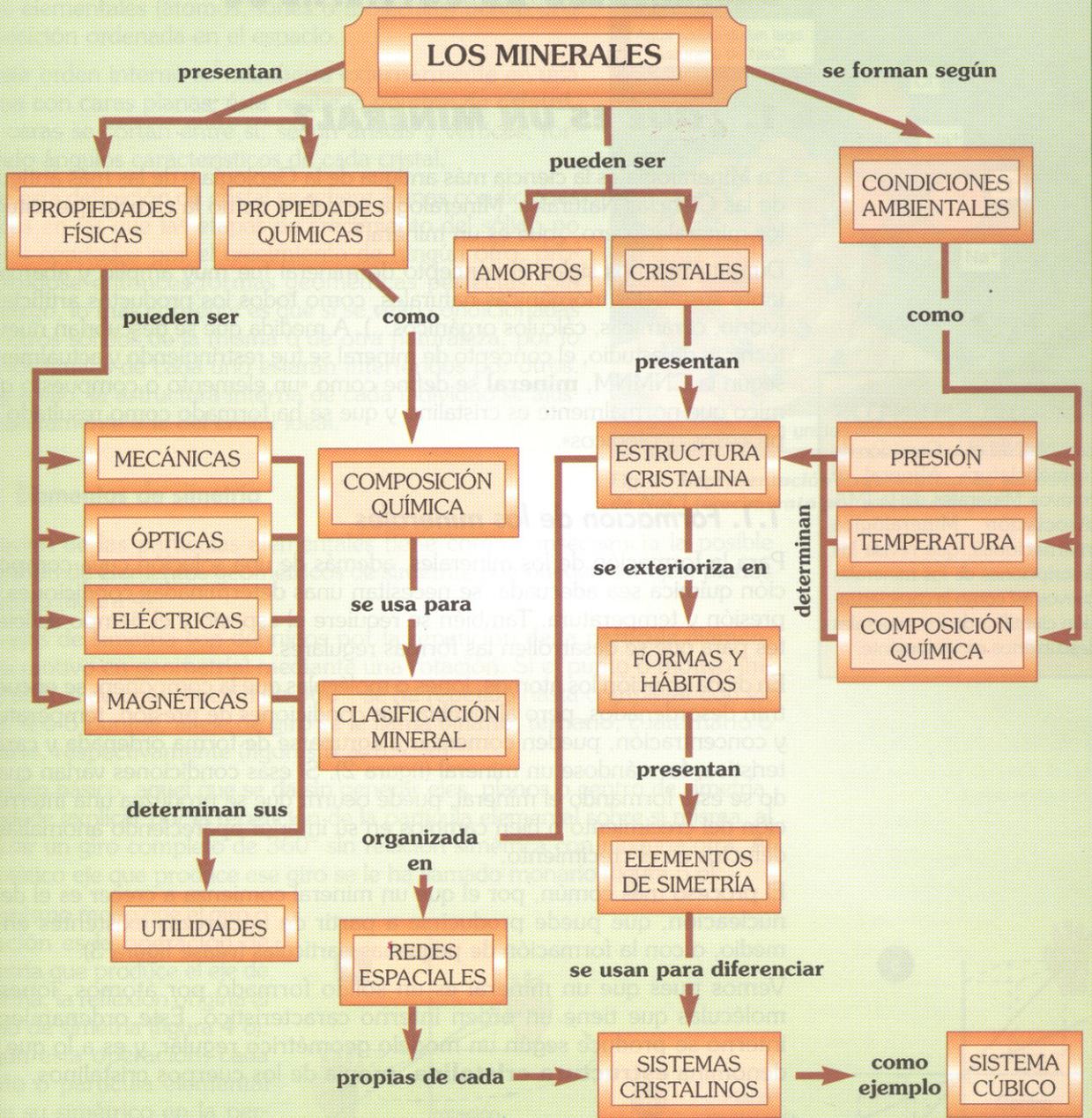


Fig. 1. Cristal de corindón.

## ESQUEMA CONCEPTUAL



## ACTIVIDADES INICIALES

1. ¿Sabrías decir qué es un mineral y cómo se forma?
2. ¿Cuántos elementos de simetría conoces? ¿Podrías definir alguno?
3. ¿Conoces algún mineral del grupo de los óxidos? ¿y de los sulfuros? Nombra los que recuerdes e indica una o varias propiedades físicas de ellos.
4. ¿Recuerdas algún subgrupo de silicatos? Indica al menos dos especies minerales de ese subgrupo.

# DESARROLLO DE CONTENIDOS

## 1. ¿QUÉ ES UN MINERAL?

La Mineralogía es la ciencia más antigua de la Geología y de las más antiguas de las Ciencias Naturales. Mineralogía se define como la ciencia que estudia los minerales, pero, ¿qué es un mineral?

Durante muchos siglos el concepto de mineral fue muy amplio y abarcaba tanto sustancias inorgánicas naturales, como todos los productos artificiales (vidrio, cerámicas, cálculos orgánicos...). A medida que se descubrían nuevas técnicas de estudio, el concepto de mineral se fue restringiendo y actualmente según la CNMNM, **mineral** se define como «un elemento o compuesto químico que normalmente es cristalino y que se ha formado como resultado de procesos geológicos».

### COMPLEMENTOS

La CNMNM es la Comisión de Nomenclatura Mineral y Nuevos Minerales de la IMA (Asociación Mineralógica Internacional), que revisa las descripciones de los minerales nuevos así como la caracterización científica de los minerales descubiertos recientemente.

### 1.1. Formación de los minerales

Para la formación de los minerales, además de una solución cuya composición química sea adecuada, se necesitan unas determinadas condiciones de presión y temperatura. También se requiere el espacio y el tiempo suficientes para que se desarrollen las formas regulares.

En dicha solución los átomos, iones o moléculas que la componen, se encuentran desordenados, pero al cambiar las condiciones de presión, temperatura y concentración, pueden comenzar a agruparse de forma ordenada y característica, formándose un mineral (figura 2). Si esas condiciones varían cuando se está formando el mineral, puede ocurrir que se produzca una interrupción del crecimiento o bien cambios en su interior apareciendo anomalías o defectos en el crecimiento.

El proceso más común, por el que un mineral comienza a crecer es el de la nucleación, que puede producirse a partir de impurezas existentes en el medio, o con la formación de pequeñas partículas (véase figura 3).

Vemos pues que un mineral es un sólido formado por átomos, iones o moléculas que tiene un orden interno característico. Este ordenamiento interno se produce según un modelo geométrico regular, y es a lo que se denomina **estructura cristalina**, propia de los cuerpos cristalinos.

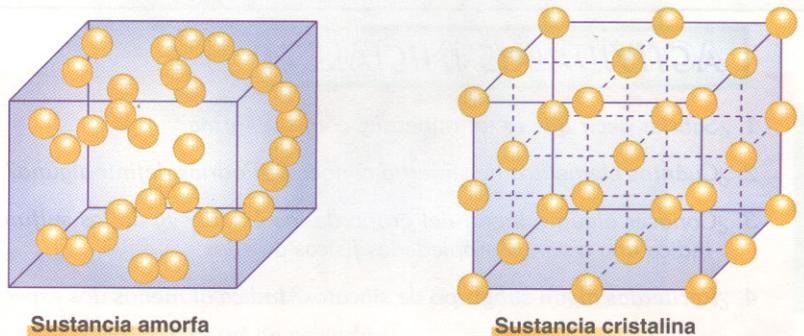


Fig. 2. Diferencias entre una sustancia amorfa y una cristalina.

## 1.2. Nociones básicas de cristalografía

Se llama sólido o **cuerpo cristalino** a aquel cuyas partículas elementales (átomos, iones o moléculas) tienen una disposición ordenada en el espacio.

Si este orden interno se manifiesta externamente en una forma con caras planas, ésta recibe el nombre de **crystal**. Las caras se cortan entre sí, según aristas y vértices, formando ángulos característicos de cada cristal.

Pero esta definición de cristal se refiere a unas condiciones ideales en las que las etapas de crecimiento del sólido no se ven coartadas por el crecimiento de ningún otro, produciéndose entonces formas geométricas perfectas. Sin embargo, lo más corriente es que sí se vean condicionadas por otros sólidos de la misma o de otra naturaleza, por lo que los límites de cada uno estarán interferidos por otros. Pese a ello, la estructura interna de cada individuo se ajusta exactamente a la del cristal ideal.

### Elementos de simetría

El orden de las partículas elementales tiene como consecuencia la posible aparición de elementos geométricos de simetría, que pueden ser ejes, planos o centro (figura 4).

Los ejes de simetría son definidos por la repetición de la partícula elemental (o motivo en geometría) mediante una rotación. Si el punto o motivo inicial, al final de una rotación de  $360^\circ$ , se ha repetido hasta completar con él, 2, 3, 4 o 6 puntos, al eje de giro se le llama binario, ternario, cuaternario o senario, respectivamente (figuras 5 a, b, c, d).

El orden básico, aquel que se da sin generar ejes, planos o centro de simetría, se puede explicar por la repetición de la partícula elemental sobre sí misma, al realizar un giro completo de  $360^\circ$  sin relación simétrica con ninguna otra. Al hipotético eje que produce ese giro se le ha llamado monario (figura 5 e).

Del mismo modo que el giro o rotación es la operación de simetría que produce el eje de simetría, la reflexión origina el plano de simetría (figura 4 b). Según esta operación, cada punto o partícula elemental tiene su simétrico en la perpendicular al plano de simetría y a la misma distancia, al otro lado de éste. Es como su imagen especular.

La inversión es la operación de simetría que produce el centro de simetría. El simétrico de un punto o partícula elemental se encuentra más allá del centro de simetría y a la misma distancia (figura 4 c).

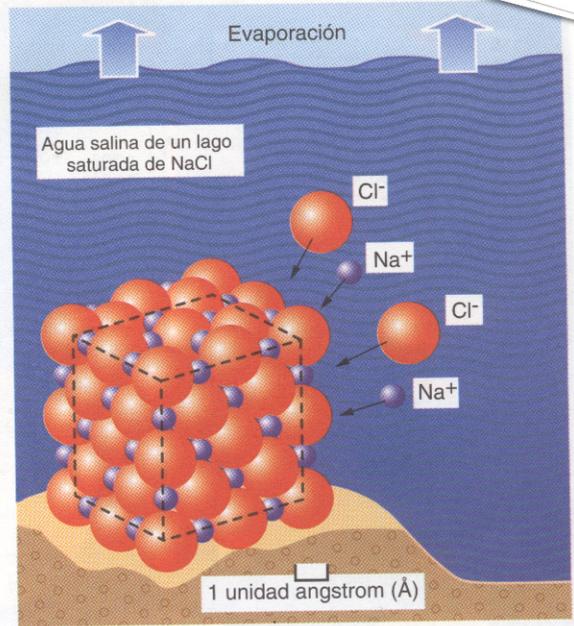


Fig. 3. Representación esquemática de un núcleo de NaCl (crecimiento por nucleación).

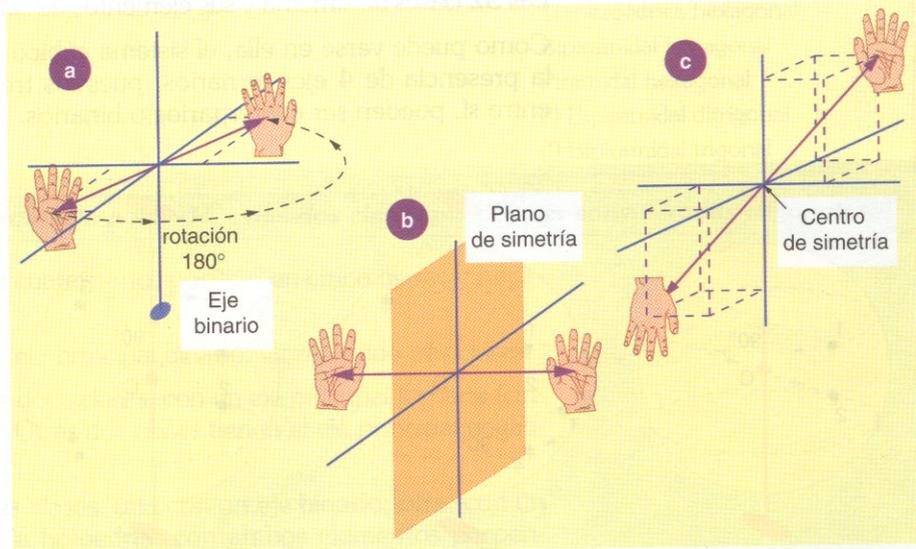


Fig. 4. a) Rotación de una mano alrededor de un eje de simetría binario. b) Reflexión respecto a un plano de simetría. c) Inversión respecto a un centro de simetría.

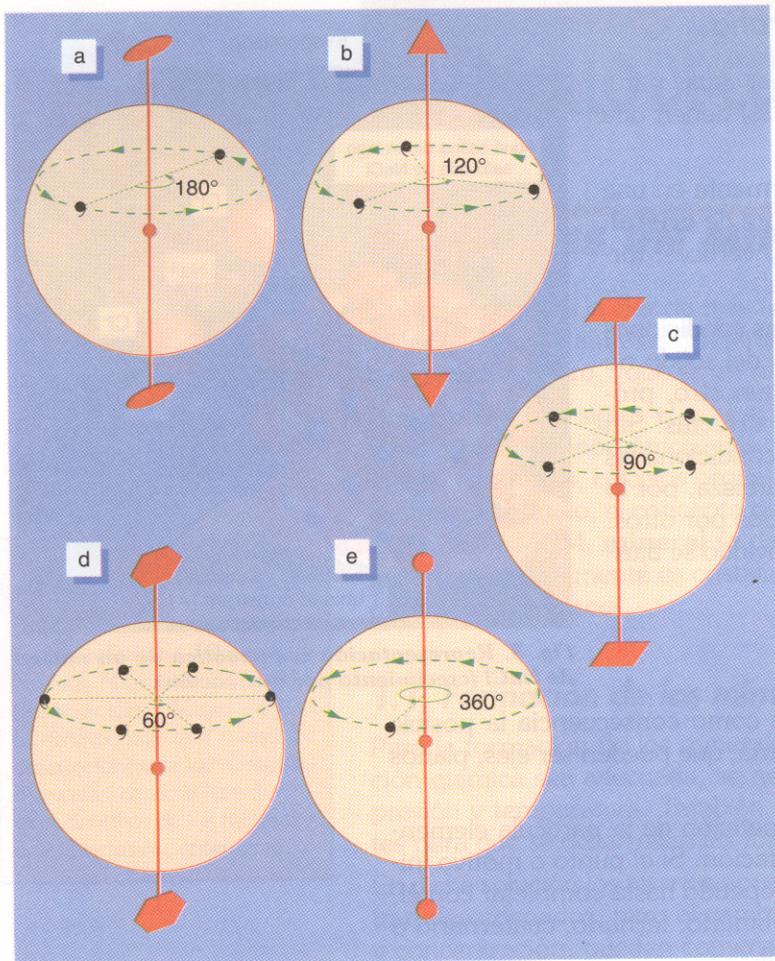


Fig. 5. Ejes de simetría binario (a), ternario (b), cuaternario (c), senario (d) y monario (e).

Rotación, reflexión e inversión son las **operaciones simples** de simetría. Puede haber también operaciones combinadas como, por ejemplo, los ejes simétricos de inversión o negativos, en los que se articulan giros parciales con sucesivas inversiones (figura 6).

### Clases y sistemas cristalinos

Los elementos de simetría sólo pueden agruparse entre sí de 32 formas diferentes, cada una de las cuales recibe el nombre de **clase de simetría**.

Estas 32 clases se pueden reagrupar o clasificar por afinidades, dando lugar a los sistemas cristalinos; son el isométrico (o cúbico), tetragonal, rómbico, monoclinico, triclinico y hexagonal-trigonal (éste puede ser definido como dos sistemas diferentes).

Dentro de cada sistema se llama **holoedría** o **clase holoédrica** a aquella que tiene el máximo de elementos de simetría; las demás son hemiedricas o tetartoédricas, por tener aproximadamente la mitad o la cuarta parte.

Los elementos de simetría que identifican al sistema se designan por la letra A (ejes) y H (planos). Los demás con las E (ejes) y P (planos). El centro de simetría, cuando

lo hay, con la C. El orden de simetría de los ejes se expresa mediante la letra correspondiente con su dígito como exponente.

Las 32 clases de simetría y sus elementos de simetría se presentan en la tabla 1.

Como puede verse en ella, el sistema cúbico o isométrico se caracteriza por la presencia de 4 ejes ternarios, pues los tres ejes principales, ortogonales entre sí, pueden ser cuaternarios o binarios.

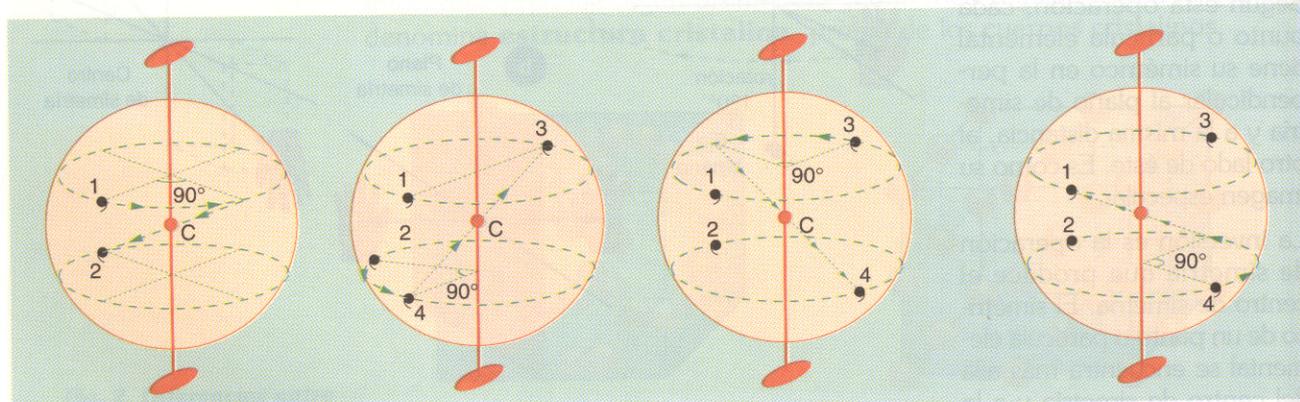


Fig. 6. Pasos sucesivos del giro de una coma (1) alrededor de un eje cuaternario de inversión o negativo.

Tabla 1:

SISTEMA	CLASE	ELEMENTOS DE SIMETRÍA	NOMBRE
<b>CÚBICO</b>	4/m 3 2/m	$3A^4 + 4E^3 + 6E^2 + 3H + 6P + C$	Hexaoctaédrica
	2 3 m	$3A^2 + 4E^3 + 6P$	Hexatetraédrica
	4 3 2	$3A^4 + 4E^3 + 6E^2$	Giroédrica
	2/m 3	$3A^2 + 4E^3 + 3H + C$	Didodecaédrica
	2 3	$3A^2 + 4E^3$	Tetartoédrica
<b>TETRAGONAL</b>	4/m 2/m 2/m	$A^4 + 3E^2 + 3E'^2 + H + 3P + 3P' + C$	Bipiramidal ditetragonal
	4 m m	$A^4 + 3P + 3P'$	Piramidal ditetragonal
	4 2 2	$A^4 + 3E^2 + 3E'^2$	Trapezoédrica tetragonal
	4/m	$A^4 + H + C$	Bipiramidal tetragonal
	4	$A^4$	Piramidal tetragonal
	-4 2 m	$-A^4 + 3E^2 + 3P'$	Escalenoédrica tetragonal
	-4	$-A^4$	Biesfenoédrica tetragonal
<b>RÓMBICO</b>	2/m 2/m 2/m	$A^2 + E'^2 + E''^2 + P + P' + P'' + C$	Bipiramidal rómbica
	2 m m	$A^2 + P' + P''$	Piramidal rómbica
	2 2 2	$A^2 + E'^2 + E''^2$	Biesfenoédrica rómbica
<b>MONOCLÍNICO</b>	2/m	$E^2 + P + C$	Prismática
	m	P	Domática
	2	$E^2$	Esfenoidal
<b>TRICLÍNICO</b>	-1	C	Pinacoidal
	1	nada (eje monario)	Pedial
<b>TRIGONAL</b>	3 2/m	$A^3 + 3E^2 + 3P + C$	Escalenoédrica trigonal
	3 m	$A^3 + 3P$	Piramidal ditrigonal
	3 2	$A^3 + 3E^2$	Trapezoédrica trigonal
	-3	$A^3 + C$	Romboédrico
	3	$A^3$	Piramidal trigonal
<b>HEXAGONAL</b>	6/m 2/m 2/m	$A^6 + 3E^2 + 3E'^2 + H + 3P + 3P' + C$	Bipiramidal dihexagonal
	6 m m	$A^6 + 3P + 3P'$	Piramidal dihexagonal
	6 2 2	$A^6 + 3E^2 + 3E'^2$	Trapezoédrica hexagonal
	6/m	$A^6 + H + C$	Bipiramidal hexagonal
	6	$A^6$	Piramidal hexagonal
	-6 2 m	$-A^6 + 3E^2 + 3P'$	(*) Bipiramidal ditrigonal
	-6	$-A^6 + P$	(*) Bipiramidal trigonal

(\*) Si se considera que  $-A^6$  equivale a  $A^3 + H$ , estas dos clases pueden ser consideradas trigonales.

El sistema tetragonal, por su eje cuaternario, positivo en cinco clases y negativo en otras dos.

El sistema rómbico, por tener un eje principal binario. Comprende tres clases.

El hexagonal-trigonal comprende doce clases, con un eje principal ternario (cinco clases) o senario (otras cinco). Otras dos clases tienen el eje principal negativo.

El sistema monoclinico tiene tres clases: una con un eje binario; otra, con un plano de simetría, y otra más, la holoedría, con ambos elementos perpendiculares entre sí.

El sistema triclinico comprende dos clases: la holoédrica, con centro de simetría, y la hemiédrica, sin ningún elemento propiamente dicho, a no ser que se considere como tal al eje monario que generaría el orden básico.

Respecto a la designación de las clases cristalinas, puede ser el de la combinación de elementos de simetría, en forma abreviada; primero se colocan los elementos principales; los ejes se designan con su dígito (2, 3, 4, 6), añadiendo el 1 para el monario triclinico; los ejes negativos con el signo - sobre el dígito del eje; todos los planos con m y la relación de perpendicularidad con el signo de quebrado ( $\perp$ ).

De este modo,  $4/m\ 3\ 2/m$  significa que la holoedría isométrica tiene ejes cuaternarios con planos perpendiculares, ejes ternarios y también binarios con planos perpendiculares. O la clase  $2/m$ , que tiene plano y eje binario perpendiculares...

También puede denominarse la clase con el nombre adjetivado de la forma general de la misma, que explicaremos a continuación.

### ✚ Formas cristalinas

Siendo familiarmente el término *forma* el que se usa para indicar el aspecto externo general de algo, en cristalografía la forma externa, el aspecto, recibe el nombre de **hábito**, mientras que **forma** consiste en un grupo de caras cristalinas que tienen la misma relación con respecto a los elementos de simetría y exhiben las mismas propiedades físicas y químicas.

Así, las formas cristalinas derivan de las operaciones de simetría aplicadas a una cara (en los cuerpos simples) o a dos o más caras diferentes (en los compuestos).

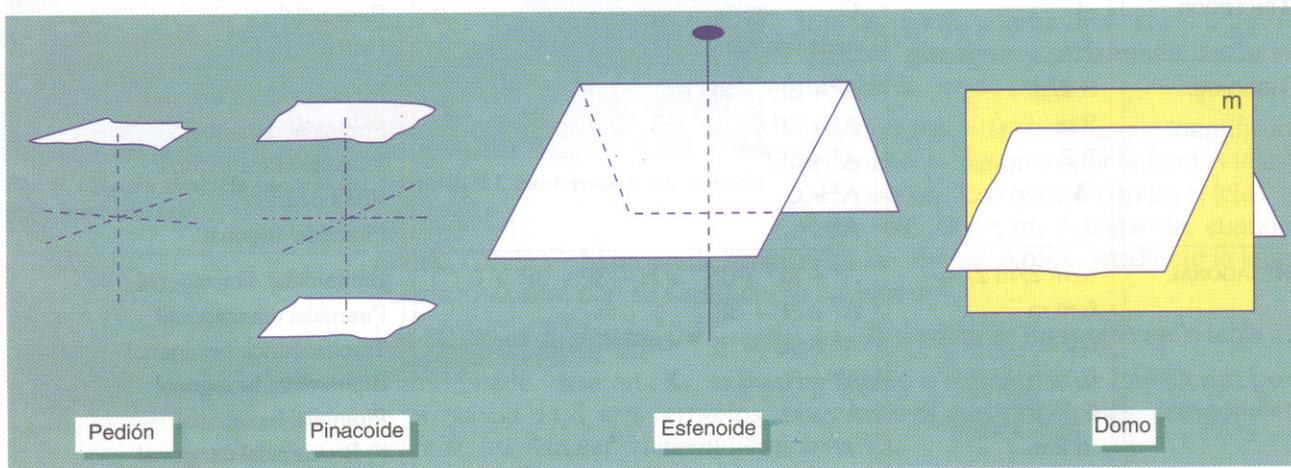


Fig. 7 a: Formas elementales.

En cada clase cristalina la posición de los elementos (ejes, planos, centro) debe considerarse siempre fija. Una cara situada en el espacio tiene una relación concreta con los elementos de esa clase, que se repite invariablemente en las caras por las operaciones de simetría. El conjunto de la cara original y de todas las caras generadas a partir de ella es lo que se conoce como forma.

Las formas más sencillas son (figura 7a):

- *Pedion:* Forma constituida por una cara aislada, no relacionada con ningún elemento de simetría.
- *Pinacoide:* Forma constituida por dos caras paralelas, relacionadas entre sí por un centro de simetría.
- *Esfenoide:* Dos caras formando un diedro, relacionadas por un eje binario.
- *Domo:* Dos caras formando un diedro, relacionadas por un plano de simetría.

Algo más complicadas son:

- **Prisma:** Formas abiertas compuestas por 3, 4, 6, 8 o 12 caras, todas paralelas al eje de rotación. Según su número de caras se llaman trigonal, tetragonal, hexagonal (con caras paralelas dos a dos), ditrigonal (también con 6 caras, pero no paralelas), ditetragonal o dihexagonal (figura 7b).
- **Pirámide:** Formas abiertas de 3, 4, 6, 8 o 12 caras, no paralelas entre sí, que se cortan en un punto. Reciben los mismos nombres que los prismas (figura 7c).
- **Bipirámide:** Formas cerradas de 6, 8, 12, 16 o 24 caras. Se pueden considerar como formadas por dos pirámides unidas por reflexión de una sobre la otra a través de un plano de simetría perpendicular al eje de rotación. Mismos nombres que para las dos anteriores (figura 7c).
- **Trapezoedros:** Formas cerradas, parecidas a las bipirámides, de 6, 8 o 12 caras (trigonal, tetragonal y hexagonal), con la mitad (superiores) giradas con respecto a la otra mitad. Se desarrollan por asociación de un eje ternario, cuaternario o senario combinado con ejes binarios perpendiculares. Las caras resultantes son trapecios. También hay un trapezoedro en el sistema isométrico.
- **Escalenoedros:** Formas cerradas de 8 o 12 caras (tetragonal y trigonal), agrupadas en pares simétricos. En el tetragonal, con dos pares de caras arriba y otros dos debajo, la relación se produce por un eje cuaternario de inversión. En el trigonal (o ditrigonal), con 3 y 3 pares de caras, la relación se produce por un eje ternario. Las caras resultantes son escalenos.

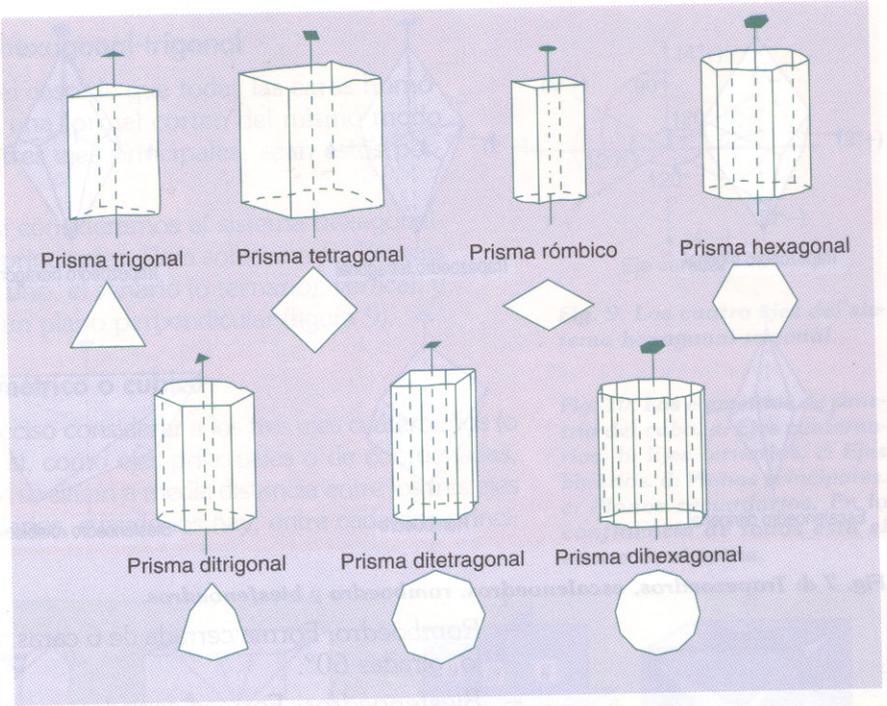


Fig. 7 b: Prismas.

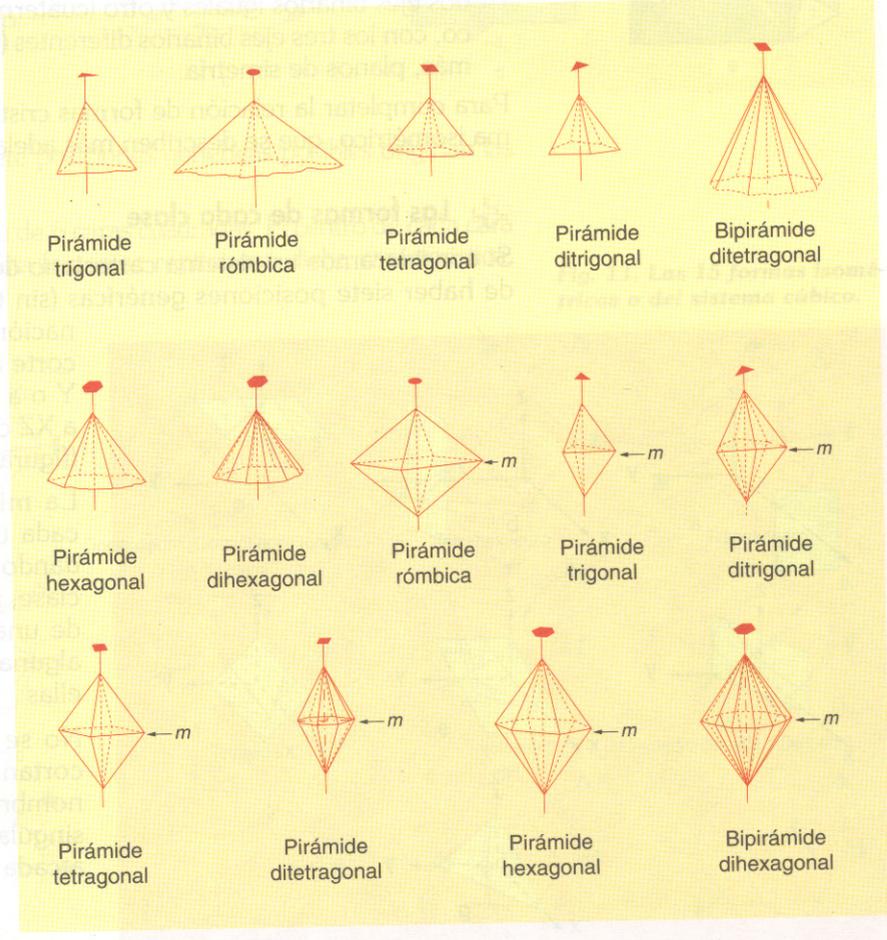
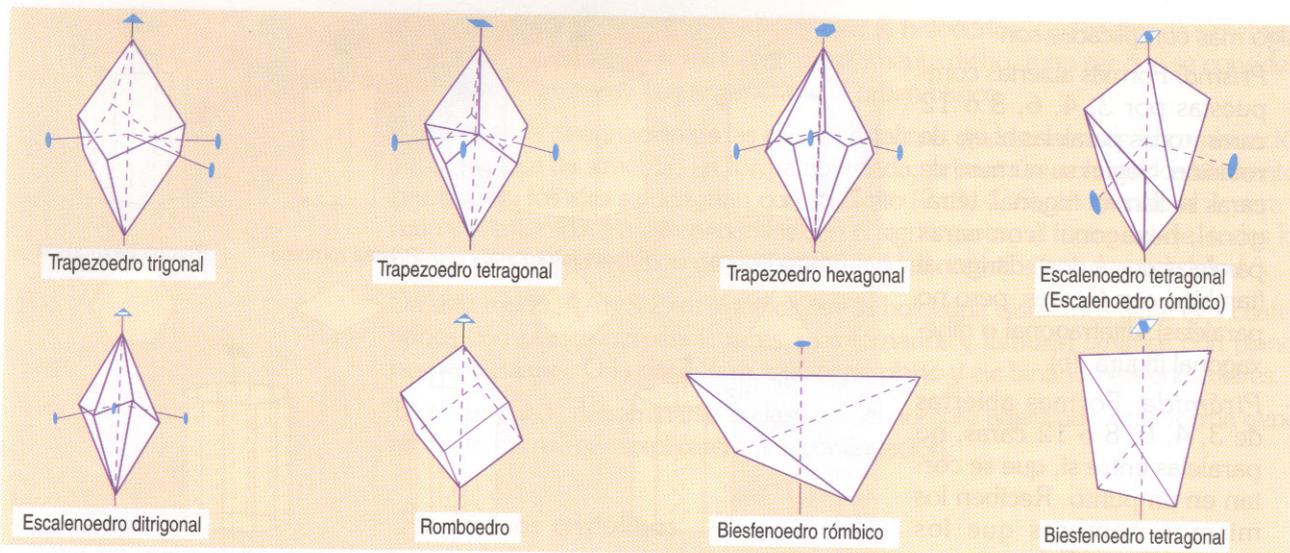


Fig. 7 c: Pirámides y bipirámides.



**Fig. 7 d: Trapezoedros, escalenoedros, romboedro y biesfenoedros.**

- **Romboedro:** Forma cerrada de 6 caras, 3 arriba, que alternan con 3 debajo, giradas  $60^\circ$ .
- **Biesfenoedros:** Formas cerradas constituidas por dos caras superiores, que alternan con dos inferiores, giradas  $90^\circ$ . Pueden ser tetragonal, con dos ejes binarios iguales y otro (cuaternario de inversión) mayor, o rómbico, con los tres ejes binarios diferentes (figura 7d). El tetragonal tiene, además, planos de simetría.

Para completar la relación de formas cristalográficas, faltan las 15 del sistema isométrico, que se describen más adelante.

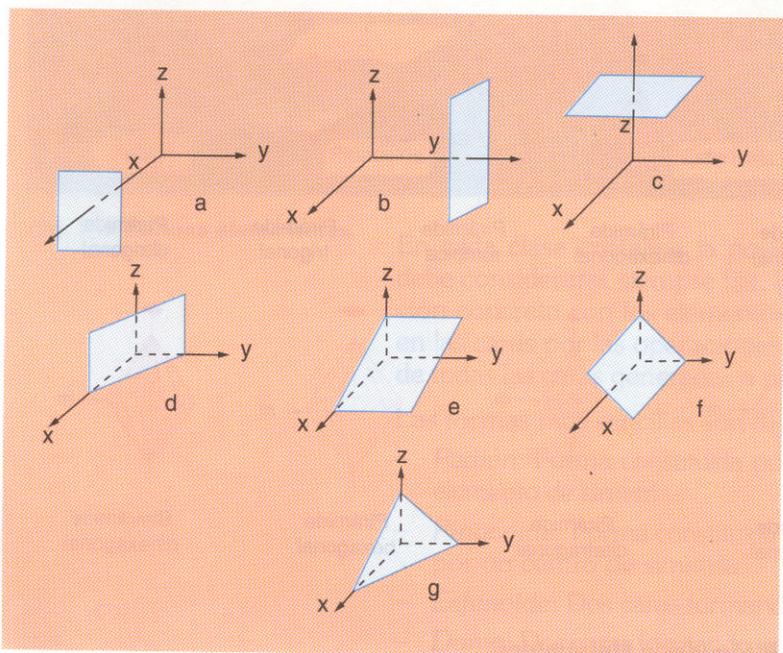
### Las formas de cada clase

Si consideramos un sistema cartesiano de tres ejes (X, Y, Z) tan sólo puede haber siete posiciones genéricas (sin tener en cuenta ángulos de inclinación) de caras, según que dicha cara

corte a un eje (tres posiciones, al X, a Y o a Z), a dos (tres posiciones, a XY, a XZ o a YZ), o a los tres (una posición) (figura 8).

La misma situación se produce en cada una de las 32 clases cristalinas, dando lugar a 7 formas fijas en dicha clase, no pudiendo combinarse formas de una clase con las de otra, aunque algunas se pueden repetir en varias de ellas.

No se repiten nunca las formas que cortan a los tres ejes y que reciben el nombre de formas generales. Por esta singularidad dan nombre, adjetivado, a cada clase.



**Fig. 8. Las 7 posiciones de una cara con respecto a un sistema de tres ejes.**

## El cuarto eje en el sistema hexagonal-trigonal

En todos los sistemas debe darse el caso de que todas las caras homólogas (es decir, las que completan una forma) corten del mismo modo –aunque en distinto orden– a los tres ejes principales, sean estos perpendiculares entre sí, o no.

Sin embargo, esto no se cumple si consideramos al sistema hexagonal-trigonal también como de tres ejes principales. Para solucionarlo, Bravais ideó un eje más, de modo que hay uno, el senario (o ternario), vertical, y otros tres (a  $120^\circ$  uno de otro) en un plano perpendicular (figura 9).

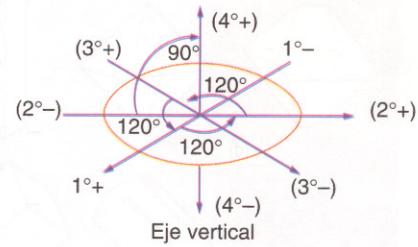


Fig. 9. Los cuatro ejes del sistema hexagonal-trigonal.

## Las formas del sistema isométrico o cúbico

Para comprender lo siguiente es preciso considerar a los tres ejes cuaternarios (o los tres binarios) ortogonales entre sí, como ejes principales o de coordenadas, fijos en el espacio. Los ejes ternarios se sitúan a media distancia entre los tres ejes principales; los seis binarios secundarios, cuando los hay, entre cada dos principales (figura 10).

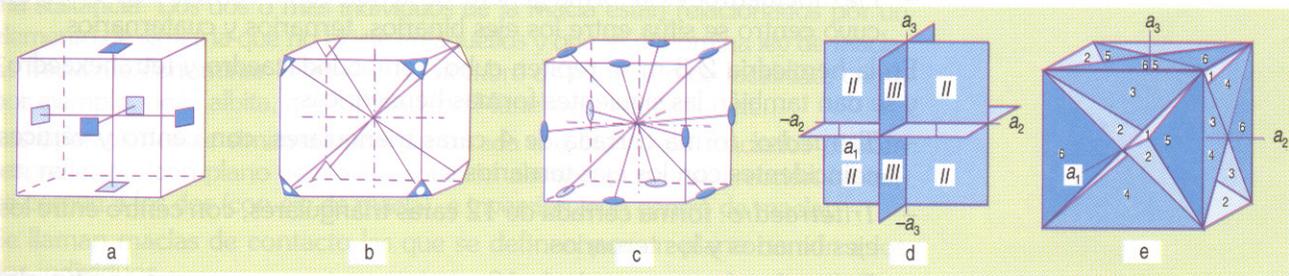
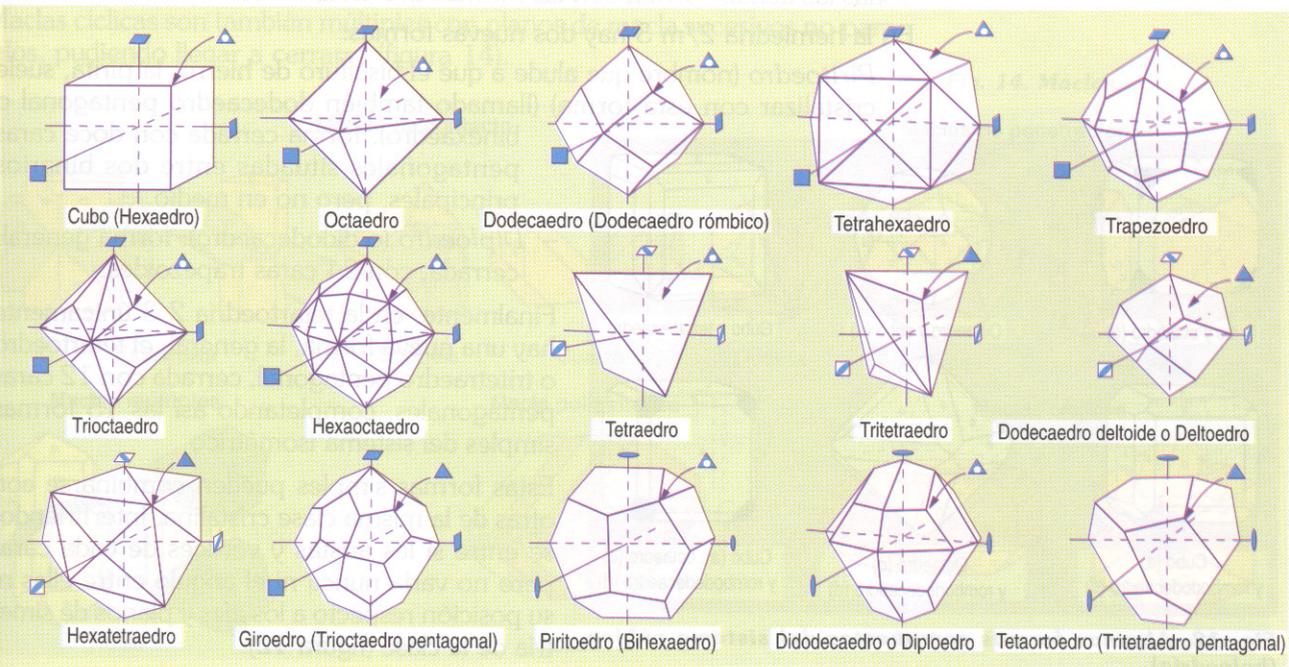


Fig. 10. Los elementos de simetría del cubo. a: Ejes cuaternarios. b: Ejes ternarios. c: Ejes binarios. d: Planos principales. e: Planos secundarios. En la confluencia de todos está el centro de simetría.

En la holoedría ( $4/m \bar{3} 2/m$ ) las siete posiciones genéricas posibles originan las siguientes formas (figura 11):

- **Cubo o hexaedro:** forma cerrada de 6 caras cuadradas. El centro de cada cara coincide con un eje principal. Esta forma se repite, con dicha característica, en las cinco clases isométricas.

Fig. 11. Las 15 formas isométricas o del sistema cúbico.



- *Rombododecaedro*: forma cerrada de 12 caras que son rombos. El centro de cada cara coincide con un eje binario. También presente en las cinco clases, cuando no hay ejes binarios secundarios, el rombododecaedro se sitúa en medio entre cada dos ejes principales.
- *Octaedro*: forma cerrada de 8 caras triangulares, cuyo centro coincide con los ejes ternarios.
- *Tetrahexaedro*: forma cerrada de 24 caras triangulares. El centro está entre los ejes cuaternarios y binarios. Su nombre deriva de su aspecto, como si cada cara del cubo se apuntase desde las cuatro aristas hacia su centro.
- *Trioctaedro*: forma cerrada de 24 caras triangulares, con centro entre los ejes ternarios y binarios. Como en el caso anterior es como si cada cara de octaedro se apuntase desde las tres aristas hacia el centro.
- *Trapezoedro*: forma cerrada de 24 caras que son trapecios, con el centro entre los ejes cuaternarios y ternarios. Se le puede considerar como si en el octaedro se apuntase cada cara, desde los tres vértices hasta el centro.
- *Hexaoctaedro*: es la forma general de la holoedría, cerrada con 48 caras, cuyo centro se sitúa entre los ejes binarios, ternarios y cuaternarios.

En la hemiedría 2 3 m se repiten cubo, rombododecaedro y tetrahexaedro, y se dan también las siguientes formas hemiédricas:

- *Tetraedro*: forma cerrada de 4 caras triangulares, con centro y vértices coincidentes con los ejes ternarios.
- *Tritetraedro*: forma cerrada de 12 caras triangulares, con centro entre los ejes binarios y los ternarios.
- *Deltoedro*: forma cerrada de 12 caras trapecios, cuyo centro se sitúa alejado del eje binario, más allá del ternario.
- *Hexatetraedro*: forma general de la hemiedría, cerrada, con 24 caras triangulares.

En la hemiedría 4 3 2 la única forma no nombrada hasta ahora es la general, el giroedro o trioctaedro pentagonal, cerrada, de 24 caras pentagonales. Todas las demás formas son las mismas que en la holoedría.

En la hemiedría 2/m 3 hay dos nuevas formas:

- *Piritoedro* (nombre que alude a que el bisulfuro de hierro, la pirita, suele cristalizar con esta forma) (llamado también dodecaedro pentagonal o bihexaedro): forma cerrada con doce caras pentagonales situadas entre dos binarios principales, pero no en medio.
- *Diploedro* (o didodecaedro): forma general, cerrada, con 24 caras trapezoides.

Finalmente, en la tetartoedría 2 3 únicamente hay una nueva forma, la general, el tetartoedro o tritetraedro pentagonal, cerrada con 12 caras pentagonales, completando así las 15 formas simples del sistema isométrico.

Estas formas simples pueden combinarse con otras de la misma clase cristalina, interfiriéndose entre sí las aristas y vértices de cada cara, pero no varía nunca ni el ángulo entre ellas ni su posición respecto a los ejes y planos de simetría de la clase (figura 12).

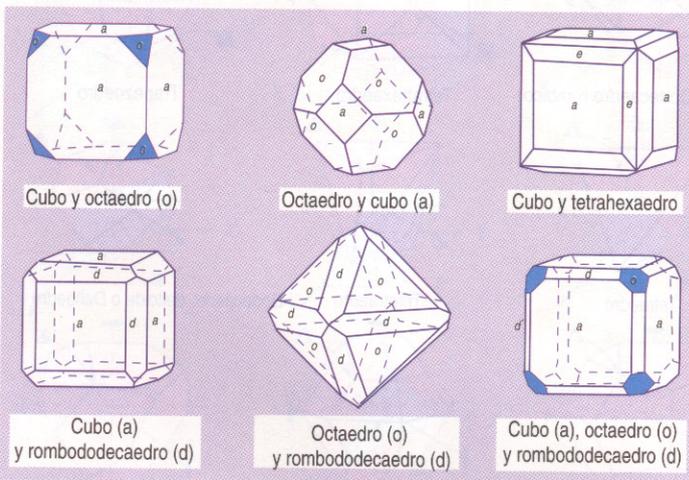
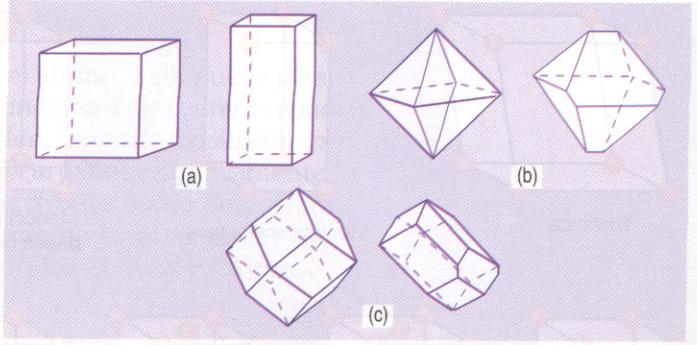


Fig. 12. Algunas formas compuestas del sistema cúbico (holoedría).

## ✚ Hábito cristalino

El término **hábito** se usa en Cristalografía para designar el aspecto general de un cristal, como por ejemplo, cúbico, prismático, octaédrico, bipyramidal, fibroso, tabular, etc...

Como el crecimiento de un cristal está controlado por el medio ambiente, el hábito de una especie mineral puede variar de una localidad a otra. Rara vez los cristales tienen un hábito geométrico perfecto o ideal, pero aun en los cristales defectuosos o mal formados es evidente la simetría, por el aspecto de las caras y, lo que es más importante, por la conservación de los ángulos diedros, hecho ya observado por N. Stenon, a comienzos del siglo XVII (figura 13).



**Fig. 13. Ejemplos de hábitos cristalinos en el sistema cúbico. a) Cubo ideal (izquierda) y malformado. b) Octaedro ideal y malformado. c) Rombododecaedro ideal y malformado.**

## ✚ Maclas

Se llama **maclas** a los crecimientos conjuntos de dos o más cristales de la misma sustancia. Los dos o más individuos de la macla están relacionados por un elemento de simetría que no existe en aquéllos y que se denomina ley de macla. Es frecuente denominar la ley con un nombre de mineral o de localidad, como por ejemplo, de la albita, de Carlsbad, de Manebach, del rutilo, etc...

Las operaciones de simetría que ligan a cada dos individuos maclados pueden ser: reflexión (con plano de macla), rotación alrededor de una dirección cristalina común a los dos (con eje de macla), e inversión (con centro de macla).

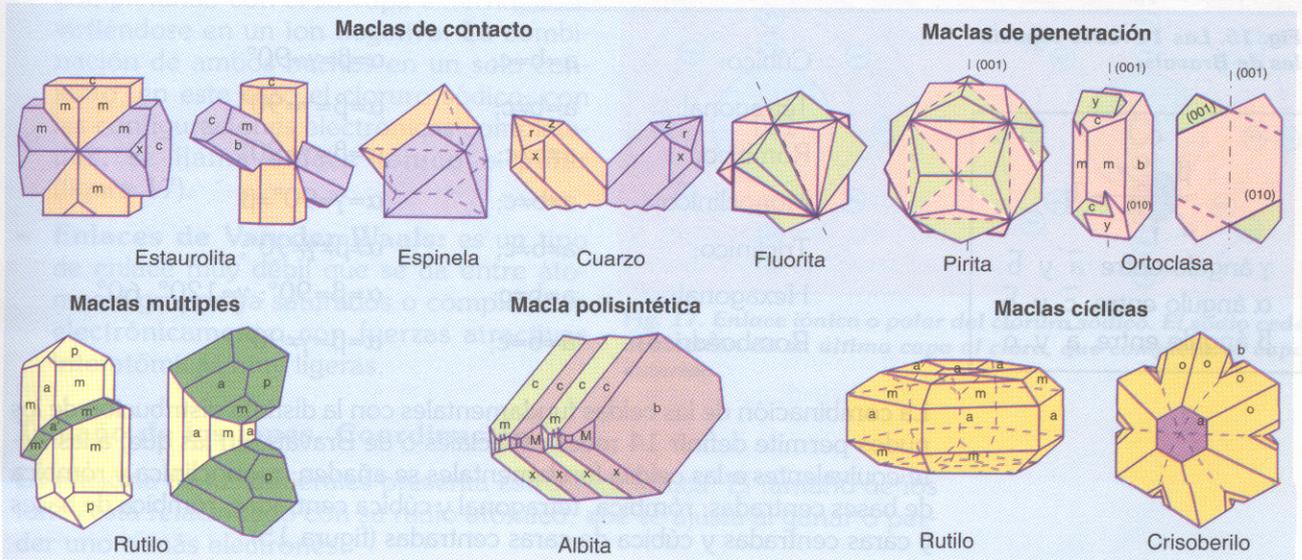
Se llaman maclas de contacto las que se definen por un plano común a los dos individuos.

Las maclas de penetración están formadas por distintos cristales interpenetrados, con una superficie de unión irregular.

Las maclas múltiples se forman por tres o más individuos maclados según la misma ley.

Las maclas polisintéticas son un tipo de maclas múltiples con planos de macla sucesivamente paralelos.

Maclas cíclicas son también múltiples con planos de macla sucesivos no paralelos, pudiendo llegar a cerrarse (figura 14).



**Fig. 14. Maclas.**

## ⊕ Redes espaciales

Todo lo dicho hasta aquí se refiere a la morfología cristalina en cuanto a que la estructura interna de la materia tiene su reflejo en la forma externa. Trataremos ahora de la estructura interna propiamente dicha.

Dos procedimientos suelen emplearse para visualizar el espacio interno cristalino, a sabiendas de que ambos suponen una idealización de la estructura atómica de la materia: representar átomos, iones o grupos iónicos como esferas que están en contacto entre sí, o como puntos geométricos o nudos de una red. En este caso se designa red espacial cristalina.

La red espacial está formada por la repetición, en las tres direcciones del espacio, de la llamada celda o poliedro fundamental, que se define por tres vectores,  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  y  $\vec{c}$ , cada uno de los cuales determina la traslación desde un nudo cualquiera a los 3 nudos espacialmente más cercanos. Los ángulos entre los vectores se denominan  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

Según sean estos vectores y los ángulos entre ellos resultan 7 tipos de celdas fundamentales que se identifican con los sistemas cristalinos:

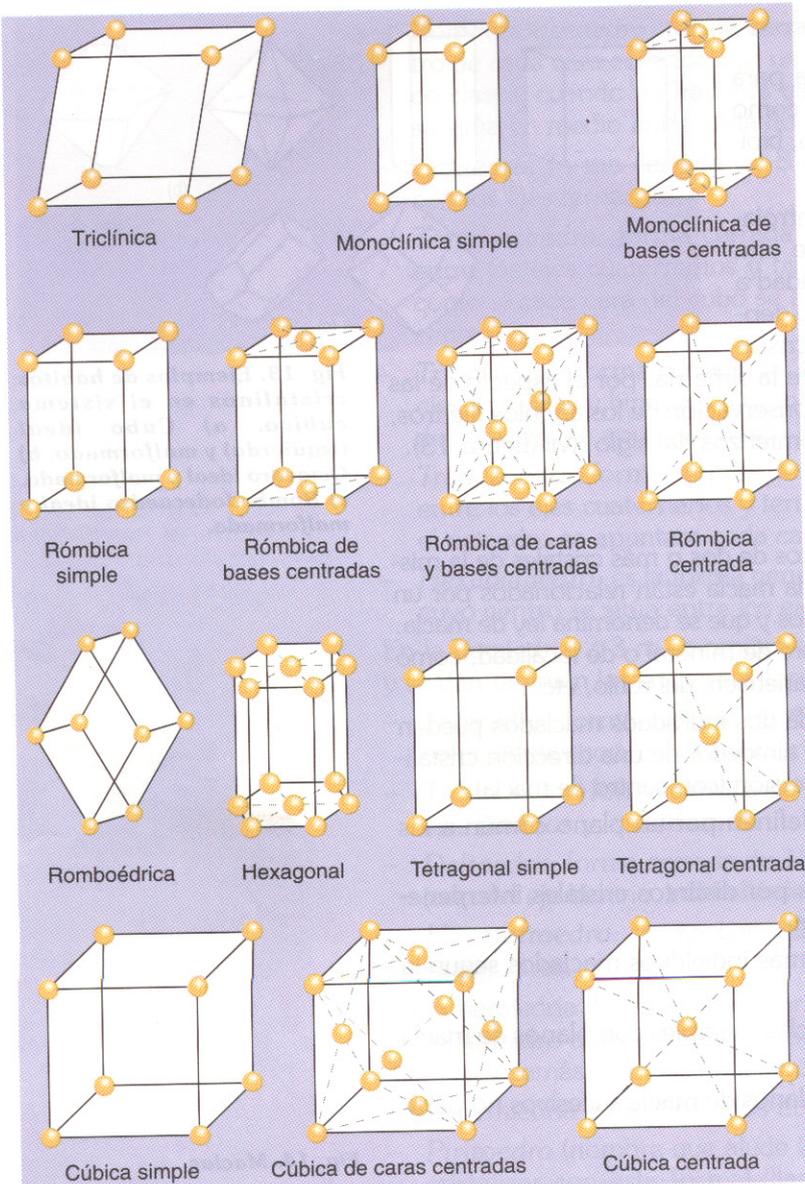
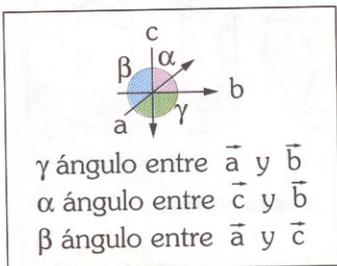


Fig. 15. Las 14 redes espaciales de Bravais.



Cúbico:	$a=b=c;$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Tetragonal:	$a=b\neq c;$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Rómbico:	$a\neq b\neq c;$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ;$
Monoclónico:	$a\neq b\neq c;$	$\alpha=\gamma=90^\circ\neq\beta$
Triclínico:	$a\neq b\neq c;$	$\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ;$
Hexagonal:	$a=b\neq c;$	$\alpha=\beta=90^\circ; \gamma=120^\circ, 60^\circ$
Romboédrico:	$a=b=c;$	$\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$

La combinación de las celdas fundamentales con la distinta distribución de los nudos permite definir 14 redes espaciales o de Bravais, en las que, a las siete equivalentes a las celdas fundamentales se añaden: monoclínica y rómbica de bases centradas; rómbica, tetragonal y cúbica centradas; rómbica de bases y caras centradas y cúbica de caras centradas (figura 15).

## + Cristalográfica

La unidad esencial de la estructura cristalina es el átomo. Éste puede estar asociado con otros formando un grupo que funciona como una unidad estructural. El átomo está formado por un núcleo, cargado positivamente, rodeado por una o más capas de electrones cargados negativamente. Se puede considerar al conjunto de núcleo y electrones como una esfera de radio del orden de 1 Å, aunque éste depende de la especie del elemento, del estado de ionización y del enlace con los átomos próximos.

### Enlaces entre átomos

- **Enlace metálico:** los metales, que deben su cohesión a este tipo de enlace, son elementos cuyos átomos dejan en libertad a los electrones exteriores. Los átomos se presentan empaquetados con carga positiva y los electrones desprendidos se mueven libremente. A ello se debe que sean buenos conductores del calor y de la electricidad.
- **Enlace covalente u homopolar:** la estabilidad de un átomo se consigue cuando la capa electrónica está completa, fenómeno que se da especialmente en los gases inertes.

También se puede conseguir la estabilidad en un grupo de dos o más átomos, cuando éstos comparten electrones de sus respectivas capas externas, de modo que, entre todos, completan dichas capas.

Un ejemplo es el del cloro, cuyos átomos tienen 7 electrones externos, alcanzando su estabilidad si llegan a 8. Ello se consigue si dos átomos de cloro comparten su capa externa (figura 16).

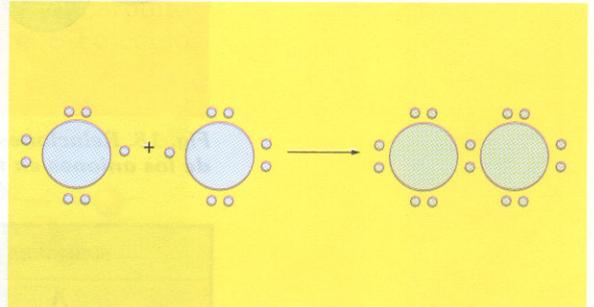


Fig. 16. La molécula estable de  $\text{Cl}_2$  se consigue por enlace covalente de los dos átomos de Cl que comparten los electrones de su capa externa.

- **Enlace iónico o polar:** los átomos pueden completar su capa electrónica exterior añadiendo o quitando electrones a ella. Así, un átomo de sodio puede perder el electrón de su capa externa convirtiéndose en un ion positivo. Un átomo de cloro puede, asimismo, ganar un electrón completando con él su capa externa, convirtiéndose en un ion negativo. La combinación de ambos hechos en un solo conjunto, en este caso el cloruro sódico, con las configuraciones electrónicas completadas, se llama enlace iónico o polar (figura 17).

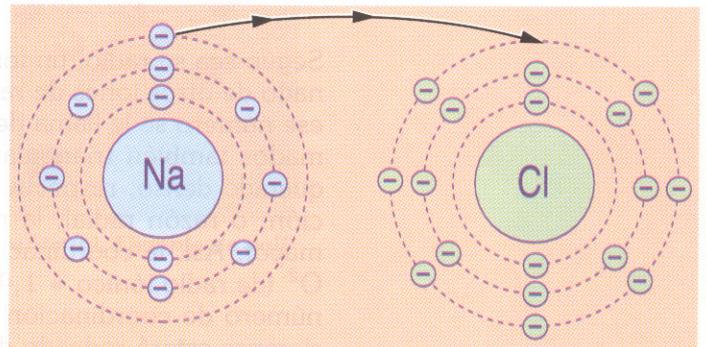
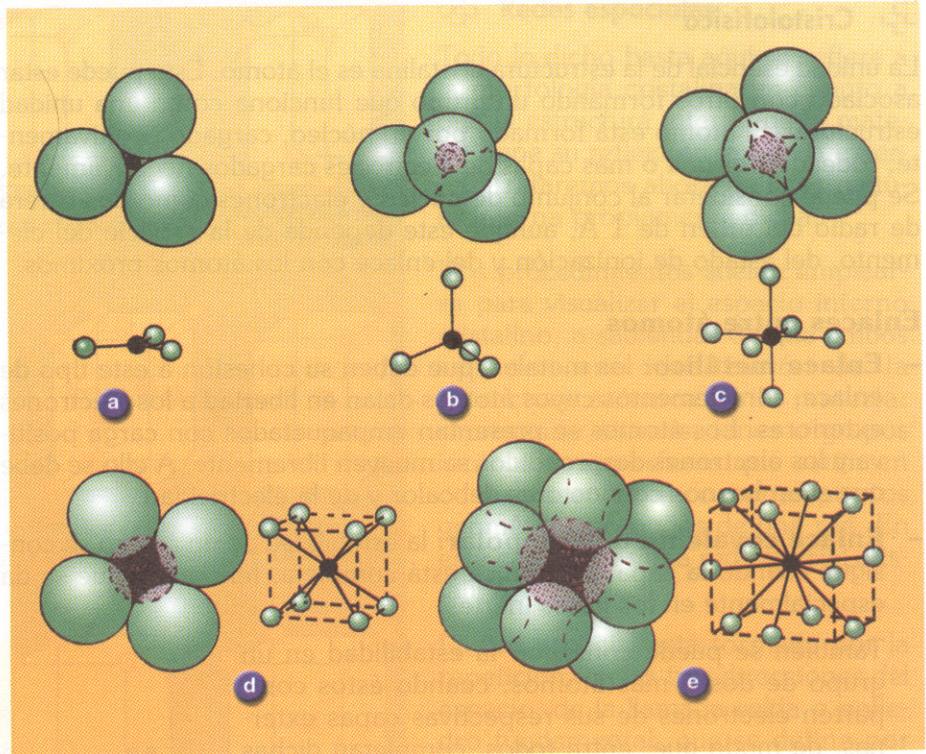


Fig. 17. Enlace iónico o polar del cloruro sódico. El sodio cede el electrón de su última capa al cloro, que completa su capa exterior.

- **Enlaces de Van der Waals:** es un tipo de enlace muy débil que se da entre átomos o grupos ya saturados o completados electrónicamente, con fuerzas atractivas interatómicas muy ligeras.

### Tamaño de los iones. Coordinación

La mayoría de los minerales presenta estructura iónica. El tamaño de los iones está relacionado con su radio atómico, que se ajusta al ganar o perder uno o más electrones.



**Fig. 18. Relaciones entre la razón radial, el número de coordinación y la distancia de los aniones en torno a un catión central.**

SUBFIGURA	RAZÓN RADIAL	Nº DE COORDINACIÓN
A	0,15 - 0,22	3
B	0,22 - 0,41	4
C	0,41 - 0,73	6
D	0,73 - 1	8
E	1	12

Según sea su radio, un ion puede estar rodeado por un número determinado de otros iones de radio mayor o igual (por ejemplo, de oxígeno). A ese número se le llama de coordinación, y puede ser 3, 4, 6, 8 o 12 (llamados también triangular, tetraédrico, octaédrico, hexaédrico y empaquetado denso, respectivamente) (figura 18). Se entiende por coordinación, o razón radial, la relación entre los radios de los iones menor y mayor. Así, la coordinación entre el  $\text{Si}^{4+}$  (de radio iónico = 0,42 Å) y el  $\text{O}^{2-}$  (de radio iónico = 1,40 Å) es de 0,30, muy cercano al valor ideal del número de coordinación 4 (0,22 a 0,41), lo que significa que el silicio siempre estará rodeado de 4 oxígenos.

### **Cristaloquímica**

Las estructuras cristalógraficas están en relación directa con la fórmula química del mineral. No obstante, no es raro encontrar casos especiales por su variabilidad, como son el isomorfismo, polimorfismo y pseudomorfismo.

## Isomorfismo

Se llama **isomorfismo** al fenómeno por el cual sustancias con fórmulas químicas parecidas tienen estructuras cristalinas similares. Dichas sustancias o minerales se llaman **isomorfos** y pueden formar familias. Un buen ejemplo de isomorfismo se da entre la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) y la fayalita ( $Fe_2SiO_4$ ). Como el  $Mg^{2+}$  y el  $Fe^{2+}$  tienen un radio iónico parecido y la estructura cristalina de ambos minerales es la misma, puede haber un mineral intermedio con cualquier proporción de Fe sustituyendo al Mg (o viceversa), formando la familia isomorfa del olivino.

Existe gran cantidad de familias isomorfas de minerales: las espinelas, piroxenos, plagioclasas, etc...

## Polimorfismo

Se llama polimorfismo al fenómeno por el cual dos o más sustancias con fórmula química idéntica presentan estructuras cristalinas diferentes. Su causa está en la diferencia de presión y temperatura en el momento de su formación.

Un ejemplo clásico de polimorfismo se da con el  $CaCO_3$ , que puede cristalizar como calcita (romboédrica) o aragonito (rómico); el carbono como diamante (cúbico) o grafito (hexagonal) (figura 19); el  $S_2Fe$  como piritita (cúbico) o marcasita (rómico), etc...

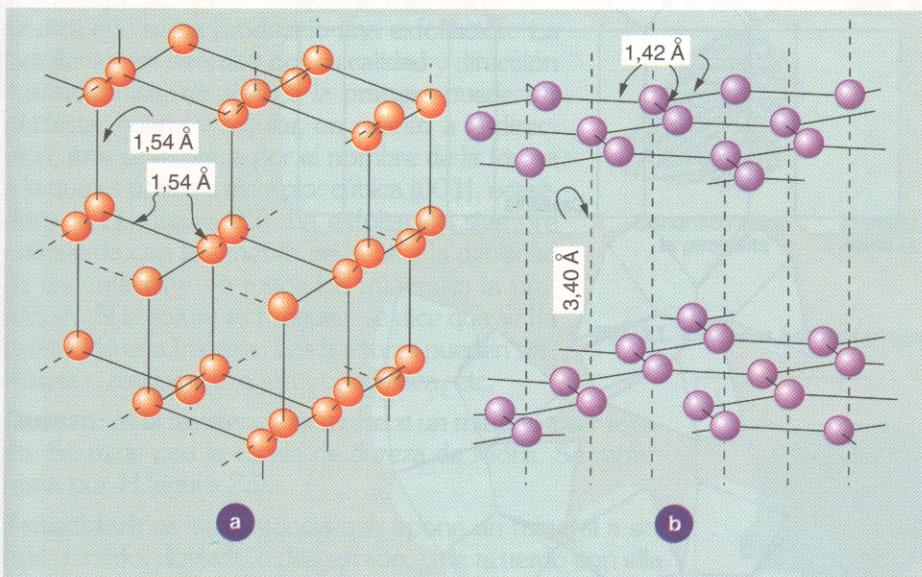


Fig. 19. Ordenaciones atómicas del diamante (a) y del grafito (b). Ejemplo de polimorfismo.

## Seudomorfismo

Se llama pseudomorfismo al fenómeno por el cual un mineral puede reemplazar a otro de estructura diferente sin que haya ningún cambio en su forma externa. Se puede producir sin cambio de sustancias o con cambio de unos elementos por otros nuevos.

Ejemplos de pseudomorfismo son la calcita respecto al aragonito, y el rutilo respecto a la brookita.

## ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA - APRENDIZAJE

### De refuerzo

1. ¿Qué elementos de simetría caracterizan al sistema cúbico?
2. ¿En qué se diferencian el trapezoedro cúbico y el trioctaedro?
3. ¿En qué se diferencian el tetraedro y los biesfenoedros?
4. ¿Qué número de coordinación tiene un elemento cuya razón radial es de 0,35?
5. Explica la diferencia entre domo y esfenoide.

### De ampliación

1. Fotocopia los dos desarrollos de cuerpos cristalográficos en cartulina, recórtalos, pégalos y busca los elementos de simetría que tienen.

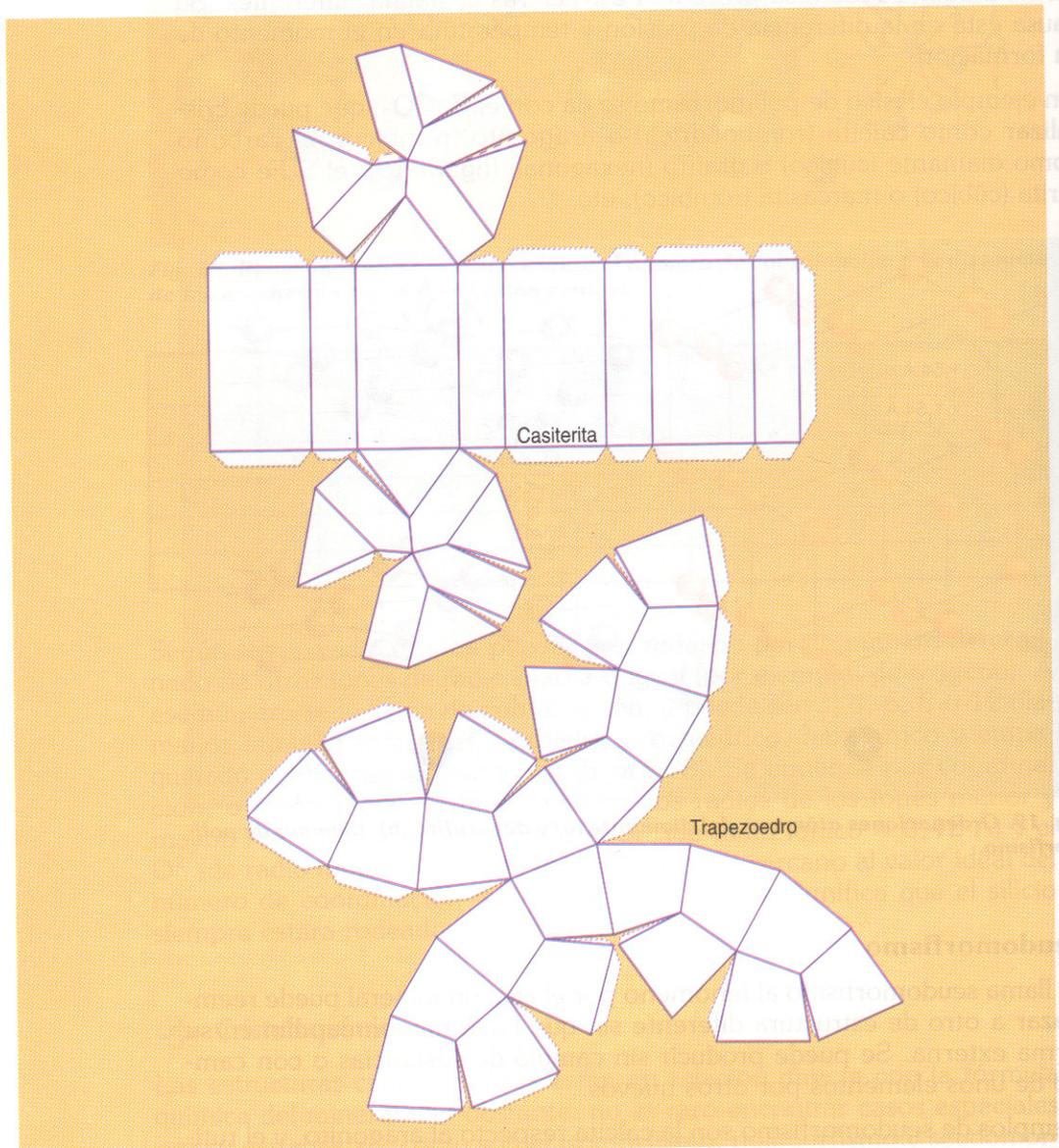


Fig. 20. Desarrollo de dos cuerpos poliédricos.