

CRISTALOGRAFÍA RECREATIVA

CRISTALOGRAFÍA RECREATIVA

Martha Henao Vásquez



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Medellín, 2010

548

H35 Henao Vásquez Martha

Cristalografía recreativa / Martha Henao Vásquez –
Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 2010.

175 p. il. col.

ISBN:978-958-719-777-8

1. CRISTALOGRAFÍA. 2. CRISTALES. I. Henao Vásquez,
Martha. II. Título.

Cristalografía Recreativa

© Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

© Martha Henao Vásquez

Primera edición, marzo de 2011

ISBN: 978-958-719-777-8

Diseño de Carátula y Diagramación: Madaly López González

Centro de Publicaciones

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin autorización escrita del titular
de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en Medellín, Colombia

DEDICATORIA

*Al inmenso valor de Domy,
Andrés, y María Isabel.*

*“... por lo que es, un cristal es simplemente,
El universo en miniatura.”*

Martha Henao Vásquez

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	DESARROLLO DE LOS CRISTALES.....	14
3.	TAMAÑO DE LOS CRISTALES.....	16
3.1.	Cristales Gigantes.....	17
4.	MINERALOIDES.....	29
5.	CRISTALIZACIÓN.....	31
5.1.	CRECIMIENTO DE UN CRISTAL.....	33
5.2.	ORDEN INTERNO EN LOS CRISTALES.....	35
5.3.	ELEMENTOS DE SIMETRÍA.....	37
5.3.1.	Eje de simetría.....	38
5.3.2.	Plano de simetría.....	42
5.3.3.	Centro de simetría.....	43
5.3.4.	Eje de inversión.....	44
5.4.	FORMAS PARA EXPRESAR LA SIMETRÍA DE LOS CRISTALES.....	46
5.4.1.	Notación simple ó sencilla.....	46
5.4.2.	Notación Hermann Mauguin.....	47
5.5.	CONVENCIONES PARA EXPRESAR LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN.....	49
5.5.1.	Sistema Cúbico ó Isométrico.....	49
5.5.2.	Sistema Tetragonal.....	50
5.5.3.	Sistema Hexagonal - División Hexagonal.....	51
5.5.4.	Sistema Hexagonal - División Romboédrica.....	51
5.5.5.	Sistema Rómbico u Ortorrómbico.....	52

5.5.6.	Sistema Monoclínico	52
5.5.7.	Sistema Triclínico	53
5.6	EQUIVALENCIAS DE LOS EJES DE INVERSIÓN	53
5.7.	SÍMBOLOS QUE IMPLICAN LA EXISTENCIA DE CENTRO DE SIMETRÍA.....	54
5.8.	EJERCICIOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN A LA NOTACIÓN SIMPLE.....	54
5.9.	EJERCICIOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA NOTACIÓN SIMPLE A LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN.....	57
5.10.	PROYECCIONES ORTOGONALES	62
5.10.1.	Representación ortogonal de un eje Monario simple.	63
5.10.2.	Representación ortogonal de un eje Binario simple...	63
5.10.3.	Representación ortogonal de un eje Ternario simple.	64
5.10.4.	Representación ortogonal de un eje Cuaternario simple.....	65
5.10.5.	Representación ortogonal de un eje Senario simple. .	66
5.10.6.	Representación ortogonal de un eje Monario de inversión.	68
5.10.7.	Representación ortogonal	69
	de un eje Binario de inversión.	69
5.10.8.	Representación ortogonal	69
	de un eje de inversión Ternario.....	
5.10.9.	Representación ortogonal	70
	de un eje Cuaternario de inversión.....	70
5.10.10.	Representación ortogonal	71
	de un eje Senario de inversión.	71
5.11.	COMPROBACIÓN DE LAS EQUIVALENCIAS DE LOS EJES DE INVERSIÓN.	72

5.12.	PROYECCIÓN ORTOGONAL DE PLANOS DE SIMETRÍA.....	73
5.13.	COMPROBACIÓN DE LA EXISTENCIA DEL CENTRO DE SIMETRÍA EN LAS NOTACIONES 2/m, 4/m y 6/m.....	74
5.14.	EJES CRISTALOGRAFÍCOS	75
5.14.1.	Relaciones axiales	81
5.14.2.	Intersecciones de las caras	82
5.14.3.	Índices de Miller.....	84
5.15.	FORMA CRISTALINA.....	87
5.15.1.	Nombres de las Formas Cristalinas	90
5.15.1.1.	Pinacoide.....	90
5.15.1.2.	Prisma.....	90
5.15.1.3.	Bipirámide.....	91
5.15.1.4.	Trapezoedro trigonal.....	92
5.15.1.5.	Escalenoedro Hexagonal.....	92
5.15.1.6.	Romboedro	93
5.15.1.7.	Cubo ó Hexaedro.....	93
5.15.1.8.	Octaedro	94
5.15.1.9.	Dodecaedro Rómbico	94
5.15.1.10.	Trapezoedro.....	95
5.15.1.11.	Tetraedro	95
5.15.1.12.	Piritoedro.....	96
5.16.	LAS 32 CLASES CRISTALINAS.....	96
5.16.1.	Formas en el Sistema Triclínico.	99
	Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	100
5.16.2.	Formas en el Sistema Monoclínico	101
	Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	103
5.16.3.	Formas en el Sistema Ortorrómbico (Rómbico).....	104
	Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	105

5.16.4. Formas en el Sistema Tetragonal.....	106
Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	107
5.16.5. Formas en el Sistema Hexagonal-	
División Hexagonal.	108
Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	110
5.16.6. Formas en el Sistema Hexagonal-	
División Romboédrica	111
Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	114
5.16.7. Formas en el Sistema Cúbico ó Isométrico.....	115
Algunos ejemplos de la colección de estudio.....	117
5.17. MACLAS O CRISTALES GEMELOS.....	122
5.18. DESARROLLO DE HÁBITOS Y	
AGREGADOS CRISTALINOS.....	128
5.19. PROCESOS PARA LA FORMACIÓN	
DE CRISTALES.....	129
5.20. EXPERIMENTACIÓN.....	131
ÍNDICE DE FIGURAS.....	157
ÍNDICE DE TABLAS	161
BIBLIOGRAFÍA.....	163
INDICE ANALÍTICO	165
INDICE ONOMÁSTICO	171

1. INTRODUCCIÓN

El tema de este trabajo son los cristales y las diferentes formas de presentación de los minerales. Estos ocurren a veces como sólidos bien definidos (cristales), otras tantas, bastante imperfectos y en su mayoría adoptando formas imitativas de otros cuerpos ó materiales del universo.

El interés principal de este texto es proporcionar a los estudiantes que se inician en el contacto con los minerales, un compendio suficiente para aprender los conceptos y nociones fundamentales de la cristalografía interna y externa (morfológica), que permita acceder a la identificación de algunos de ellos y a la comprensión de los mecanismos principales que operaron durante su desarrollo.

La cristalografía es toda una ciencia, amplia, profunda y compleja. Fue una rama de la mineralogía hasta hace casi dos siglos, y se independizó precisamente porque no sólo poseen estructura interna los sólidos minerales, sino una infinidad de materiales, incluyendo la madera, por ejemplo.

Se pretende que este esfuerzo sea una guía elemental, bastante somera, que permita al lector lograr un acercamiento a muchas especies minerales, de reconocido interés económico y geológico. Con 163 ilustraciones propias (fotografías de minerales y diagramas), se busca mostrar la real importancia de conocer las formas en los minerales, y su verdadera correspondencia con los modelos didácticos.

La forma en sí misma no es totalmente suficiente para la identificación de minerales, se hace necesario además una buena observación de sus propiedades, tanto físicas, como químicas y ópticas y, en algunos casos, estudios más profundos logrados con potentes equipos como microscopios, etc. Por el alcance de

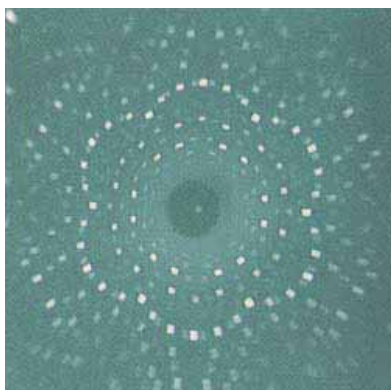
este trabajo, sólo se hará referencia a lo netamente morfológico externo. Se desarrollará entonces el tema de los cristales, las maclas y los agregados cristalinos.

El trabajo presenta con frecuencia en el material fotográfico las muestras minerales sostenidas entre los dedos ó contenidas en la mano, con el fin de permitir al lector la comprensión del tamaño real del ejemplar, en otras palabras, sirve de escala.



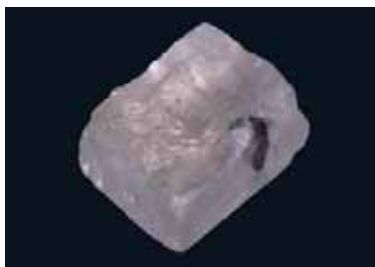
En su interior, los minerales poseen una distribución de sus átomos, ordenada y propia de cada especie. Lo anterior puede ser probado mediante un Lauegrama (fig. 1), en el que podemos prácticamente ver la fotografía del interior del mineral.

FIGURA 1. Imagen obtenida con la técnica de rayos x, de un cristal de Berilo. La distribución simétrica observada, revela la simetría Hexagonal del cristal. (Symes y Harding, 1991: 15).



Algunas veces, cuando el proceso de formación lo permite, los minerales pueden quedar en su aspecto externo limitados ó definidos por superficies planas y pulidas, las que se llamarán caras. El sólido queda entonces delimitado externamente por algunas formas particulares, como ocurre por ejemplo, en los cristales de aspecto cúbico de la sal ó Halita (NaCl) y los de la Pirita (FeS_2), (fig. 2).

FIGURA 2. Cristales cúbicos de Halita y Pirita.



Halita.

Procedencia: Zipaquirá, Cundinamarca.



Pirita.

Procedencia: Muzo, Boyacá.

2. DESARROLLO DE LOS CRISTALES

No todas las caras del cristal mostrarán siempre la misma calidad ó perfección en su desarrollo. Incluso, es frecuente observar que algunas caras se forman mientras otras no lo hacen, entonces el aspecto de algunas zonas del cristal puede aparecer sin forma. El grado de desarrollo también puede ser intermedio. Al conjunto en su totalidad se le puede llamar eudrico, si cuenta con caras bien desarrolladas, abundantes ejemplos los encontramos en la Halita, Piritita, (fig. 2), subédrico, si las caras están imperfectamente desarrolladas (algunos feldespatos y granates, ver fig. 4), y anédrico, si carece de caras (con incontables ejemplos, pues la mayoría de las ocurrencias minerales son de este tipo).

*FIGURA 3. Cristales euedrales de Cuarzo.
Procedencia: Segovia, Antioquia.*



Las piezas euedrales (fig. 3) son verdaderos ejemplos de exposición en salas de museos ó colecciones personales, ya que la forma es uno de los atractivos principales que cautiva la atención de los observadores y nos conduce, en muchos casos, a una buena aproximación en la identidad mineral. Se recomienda visitar la colección de cristales del Museo de Geociencias de la Facultad de Minas, Universidad Nacional, Sede de Medellín.

FIGURA 4. Cristales subedrales.



Según es aceptado por los cristalógrafos, sea que el sólido en mención tenga caras ó no, el término cristal hace siempre referencia a una estructura atómica interna ordenada (edificio interno cristalino), las caras se consideran más como un accidente en el desarrollo.

Aunque esto es claramente aceptado, se reservará el uso de la palabra cristal para expresar desarrollo de caras, y el término cristalino, para denotar la posesión de la distribución ordenada de átomos en la estructura.

La cristalografía se encarga del estudio de los sólidos cristalinos y de las leyes que estudian su crecimiento, al igual que su forma externa y estructura interna.

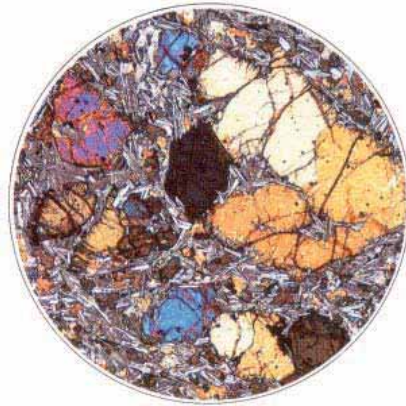
Según el campo de estudio , la cristalografía puede ser morfológica si se relaciona con la forma ó aspecto externo de los cristales, ó cristalografía interna, si se dedica más al estudio del interior cristalino. Ambos aspectos están íntimamente relacionados, pues los principios que controlan la estructura atómica del cristal, afectan también a la forma de las caras del cristal y a los ángulos interfaciales.

Como se comprenderá en temas posteriores, el comportamiento de las propiedades físicas de los minerales, la dureza por ejemplo, está estrechamente relacionada con el tipo de estructura atómica establecida. De esto concluimos la gran importancia de conocer y comprender a los minerales no solo externamente, sino en su interior.

3. TAMAÑO DE LOS CRISTALES

La continua exposición de minerales en la naturaleza nos muestra muy diversos ejemplos de variado tamaño, desde aquellos revestimientos finísimos donde no podemos apreciar cristales con nuestros ojos, ni aún con la ayuda de una lupa. Estamos aquí frente al caso de los microcristales, pues se requiere de la ayuda del microscopio para reconocerlos, (fig. 5).

FIGURA 5. Microfotografía (tomada bajo el microscopio) de una roca básica, compuesta por Olivino, piroxenos y feldespato plagioclasa. (Symes, 1988: 43).



En muchas ocasiones el tamaño alcanzado y la naturaleza de su desarrollo es tal que se hace preciso el uso aún de técnicas más potentes que el mismo microscopio; son los llamados criptocristales, que sólo podrán ser comprendidos con la ayuda de métodos de rayos x.

No cabe duda que pueden ser los cristales de exóticos tamaños, llegando a alcanzar hasta decenas de metros de longitud. Son los llamados “Cristales Gigantes”, y por su espectacularidad y rareza, consiguen ser admirados y estudiados profundamente. Mi interés personal por estas piezas, me lleva a tratarlos en más detalle.

3.1. CRISTALES GIGANTES

Uno de los aspectos más fascinantes del mundo mineral es, sin duda, el tamaño gigantesco que pueden alcanzar a desarrollar los cristales, (fig. 6).

FIGURA 6. Cristales gigantes de Cuarzo , procedentes de Brasil: (a) Cuarzo, var. Cristal de Roca y (b), Cuarzo ahumado. (Symes y Harding, 1991: 11).



En las colecciones de minerales frecuentemente observamos grandes y hermosos ejemplares de cristales, a veces con caras planas y lisas. Nadie los ha esmerilado ni pulido. Se han engendrado de esta forma en las condiciones naturales.

Algunos cristales poseen a veces proporciones grandiosas, (fig.7). En Madagascar fue hallado un trozo de cristal de roca de ocho metros de circunferencia y los japoneses tallaron con un cristal de roca de Birmania una enorme esfera de más de un metro de diámetro, que pesaba cerca de tonelada y media (Fersmann, 1966).

A pesar de la gran variación de tamaño, es importante entender que en un cristal diminuto el desarrollo es tan complejo como en uno grande, pero sin duda la mejor perfección en transparencia y forma se encuentra preferiblemente en aquellos de pequeño tamaño.

FIGURA 7. Cristal gigante de Cuarzo (Lechoso).
Procedencia: Segovia, Antioquia.



Los cristales gigantes, con pocas excepciones, son siempre menos diáfanos (transparentes) que los pequeños. Normalmente son de aspecto turbio en su interior y con notables inclusiones de agentes extraños e irregularidades en su superficie. Sus caras no presentan la “perfecta” continuidad y buen desarrollo de los finos y frecuentemente se muestran truncados por otros.

Para considerar un cristal como “Gigante” es preciso conocer primero cuál es el tamaño promedio que alcanzan corrientemente los ejemplares, y por tanto, cuando adquieran un desarrollo muy superior al tamaño común, serán entonces llamados “Gigantes”.

Por ejemplo, la dimensión corriente de los cristales de diamante es de tan sólo unos pocos milímetros, por tanto, un ejemplar de algunos centímetros ó de unas pocas decenas de centímetro será considerado excepcionalmente grande, como ocurrió con el diamante “Cullinam”, reportado hasta ahora como el más grande hallado en el mundo (el tamaño aproximado es de una mano empuñada – Réplica de este ejemplar está expuesta en el Museo de Geociencias de la Facultad de Minas).

Si consideramos a la Pirita, por ejemplo, sus cristales, bien abundantes, son de unos cuantos centímetros. Un ejemplar de 20 ó más centímetros, ya se considera en la categoría de “Gigante”.

El conocimiento e interés que el hombre tiene sobre los grandes cristales y la práctica con ellos, es tan antigua como la civilización misma.

Cuentan los historiadores, que al emperador Nerón le gustaba ver en el circo la lucha de los gladiadores a través de un gran cristal de Esmeralda verde.

Dos milenios antes de nuestros días, en las caprichosas sinuosidades de los pasos subterráneos y de los áridos desiertos de Nubia, se extraían Berilos y Esmeraldas de las célebres minas de la emperatriz Cleopatra. Las piedras verdes sacadas del fondo de la tierra eran transportadas en caravanas de camellos a las costas del mar rojo, y de allí iban a parar a los espléndidos palacios de los Rajás de la india, de los Shas de irán y de los soberanos del imperio otomano.

Después del descubrimiento de América, fueron llevadas desde Sudamérica a Europa, Esmeraldas verdes oscuras, admirables por su tamaño y belleza, (fig. 8). Luego de una cruenta lucha con los indios, los españoles se adueñaron de fabulosas riquezas de Esmeraldas extraídas en Perú y Colombia, que los naturales del país ofrendaban en el altar a su diosa. Como imagen sagrada representativa de esta diosa, servía un cristal de Esmeralda del tamaño de un huevo de avestruz. (Fersmann, 1966).

Los cristales gigantes han fascinado a la humanidad desde tiempos remotos. Ha sido grande el interés por conocerlos y entenderlos. La observación se ha constituido en una herramienta valiosa que ha permitido relacionar factores que influyen favorablemente para su ocurrencia: presiones y temperaturas controladas.

FIGURA 8. Berilo.



*Esmeraldas Colombianas.
Procedencia: Muzo, Boyacá.*

De la gran variedad de rocas existentes en la naturaleza, son las ígneas las que permiten la más completa exposición de minerales cristalizados en grandes dimensiones.

Los minerales gigantes son característicos de las Pegmatitas, que son rocas ígneas de textura granítica (de grano grueso), relacionadas genéticamente y en espacio con grandes masas ígneas de rocas plutónicas.

Este proceso de cristalización trae consigo la concentración de elementos volátiles en el resto líquido del magma que es rico en sílice, álcalis y otros volátiles, como agua, boro, flúor, cloro, fósforo, que hacen disminuir la viscosidad y facilitan la cristalización. En estas soluciones fundidas cristaliza una gran variedad de minerales que se depositan en forma de diques ó lentejones llamados Pegmatitas.

“Las Pegmatitas de granito son aquellas rocas mejores portadoras de enormes y bellos ejemplares como son los de Berilo común, de hasta doce toneladas de peso”. (Trujillo Gabriel. Medellín: 1985). Estas rocas se dividen en dos clases mineralógicas.

- Las Pegmatitas simples: Su asociación mineral es esencialmente simple y se compone de Cuarzo, feldespatos alcalinos y micas (fig. 9).

FIGURA 9. Componentes esenciales de una pegmatita: Cuarzo, feldespato potásico y mica Moscovita.



- Pegmatitas complejas: Contienen además de los minerales anteriores, otros raros, en considerable abundancia y variedad, llegando a ser de grandes tamaños.

Por ejemplo “las Pegmatitas del sur de Noruega son famosas por sus setenta minerales asociados. También son dignas de atención las conocidas Pegmatitas ricas en litio de Dakota del sur, y los minerales de litio, rubidio, cesio, arsénico y antimonio en las del norte de Suecia” (Huang, 1968).

El Cuarzo, Microclina y Mica son minerales comunes en las Pegmatitas simples y pueden ocurrir en dimensiones desproporcionadas. Sin embargo, las Pegmatitas con minerales raros son de mayor interés, especialmente las que contienen Trifilita, Columbita, Monazita, Molibdenita y Uranio. En ciertos lugares, algunos de los minerales

indicados son abundantes y forman grandes cristales, por lo que se extraen para beneficiar los elementos raros que los forman. Se han hallado Pegmatitas de Sienita nefelínica de numerosas localidades. Son generalmente ricas en Circón, Titanio y tierras raras.

La Espodumena es una especie relativamente rara que se encuentra casi exclusivamente en las Pegmatitas ricas en litio (Pegmatitas complejas) y en ocasiones forma cristales muy grandes. En la mina Etta, Black Hills, Dakota del sur, han sido hallados cristales que llegan a medir hasta doce metros de longitud y que pesan varias toneladas.

Con respecto a la Moscovita (fig. 10) se han extraído cristales de un tamaño de dos a tres metros de longitud en las minas de Mattawan, Town ship, Ontario, Canadá. Las micas aparecen en grandes láminas en las Pegmatitas siendo lo más corriente sólo pequeñas escamas y láminas de algunos milímetros ó unos cuantos centímetros.

*FIGURA 10. Moscovita. Procedencia: India.
Cristal de muy escasa ocurrencia, con desarrollo de
las Formas cristalinas: Prisma y Pinacoide basal).*



El Cuarzo, en sus distintas variedades, es el mineral más corriente hallado en proporciones exóticas. Un solo cristal de Cuarzo que se encuentra ahora en Milán es de 1.07 m de largo y 1.65 m de circunferencia, con un peso de 444 kg.

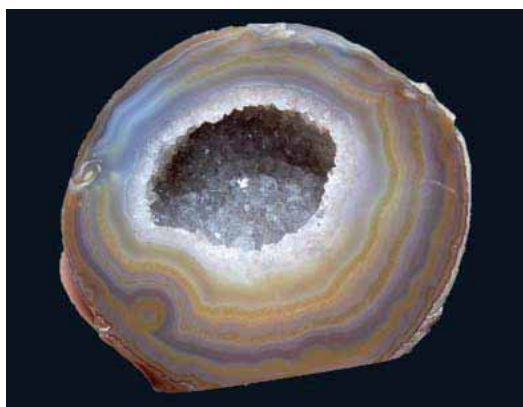
Una sola cavidad de una veta de Cuarzo cerca de Glacier Tiefen en Suiza, descubierta en 1867, produjo cristales de Cuarzo ahumado, entre los que había algunos con un peso de 90 a 113 kg.

En Portugal es posible encontrar cristales gigantes de Cuarzo morrión, mayores de un metro de altura y 150 kg de peso. También en diversas localidades del Brasil se han encontrado cristales de hasta más de 40 toneladas de peso.

Otra variedad de la sílice se separa de la lava derretida cuando los vapores calientes, saturados de sílice, depositan en ciertas vetas ó huecos, masas enormes de nódulos y geodas silíceas. Cuando empieza la destrucción de las rocas, convirtiéndose en masas arcillosas disgregadas, se separan de ellas, enormes bolas de hasta un metro de diámetro. En el estado de Oregón, en EEUU, se les conoce con el nombre de “Huevos Gigantes”. Se parten en pedazos y después se cortan en placas delgadas que se emplean para la obtención de las magníficas Ágatas laminares.

En las laderas de los Montes Urales se elevan grandiosas vetas de Cuarzo blanco y algunas de ellas se extienden por centenares de kilómetros y tienen huecos llenos de cristal de roca transparente, (fig. 11).

*FIGURA 11. Cuarzo, variedad Calcedonia.
Observe la geoda con cristales de Cuarzo en el interior.*



Una geoda gigantesca descubierta en una mina de Almería (España), asombra a los científicos: el geólogo, Javier García Guinea, no pudo contener un grito de asombro, cuando el 27 de mayo de 2001, metió la cabeza por una abertura practicada en una antigua mina de plata de Almería y se encontró en una geoda gigantesca, tapizada de grandes cristales de yeso de excepcional transparencia. La cámara mide 8 metros de longitud, 1,8 m de anchura y 1,7 m de altura, y en ella cabían 10 personas (fig. 12).

FIGURA 12. Geoda gigante de la Mina Pulpi.

Procedencia: Almería, España. (Rivera, A. 2000.

“Gigantezco hallazgo en una mina de Almería”. *Él país*. Sbdto 10-6-2000. Pág. 33.

Disponible en <http://www.ual.es/GruposInv/RecHid/geoda.htm>. 2007



Según descripción que él mismo hizo: “Los prismas cristalinos de medio metro (como promedio) cubren toda la cavidad : techo, piso y paredes, que tiene forma de balón de rugby y un tamaño muy superior al de las mayores geodas que pueden conseguirse en algunas regiones de la tierra, como el sur de Brasil, donde las geodas de Cuarzo, variedad Amatista pueden rondar el metro de diámetro y alcanzar altos precios”, (fig. 13).

La transparencia y tamaño de los cristales de Yeso que cubren enteramente su interior es tan alta que hasta se puede leer letra

FIGURA 13. Almacén de Amatistas, en Brasil.



pequeña de un libro a través de piezas gruesas. El tamaño es realmente excepcional, algunos cristales alcanzan hasta los dos metros, pero lo verdaderamente asombroso es el volumen tan enteramente grande.

En el laboratorio del museo de Ciencias Naturales, García Guinea se puso inmediatamente en contacto con la junta de Andalucía, para estudiar y proteger el hallazgo.

Su formación posiblemente tuvo que ver con la llamada crisis salina Messiniense, hace unos 5 ó 6 millones de años, cuando se produjo una exagerada evaporación del Mediterráneo, quizá porque se cerró el aporte de agua Atlántica y se formaron grandes acumulaciones salinas en las costas de este mar.

Además, se piensa que otros mecanismos geológicos en la región debieron ayudar, como la actividad volcánica, que supone aportes de metales y sulfatos. Lo cierto es que la región es un buen muestrario geológico con aguas termales, fumarolas, terremotos, minas de plata, concentraciones de Yeso, etc.

Sobre las formas transparentes del Cuarzo escribió Aristóteles, atribuyendo su origen al hielo petrificado.

El cristal de roca en el siglo XVII se extraía de los alpes suizos, a veces en cantidades hasta de 500 toneladas, es decir, 30 vagones cargados (Fersmann, 1966).

Pero no siempre es el Cuarzo quien aparece como ejemplo más exótico de manifestación de cristales gigantes. En Franklin y Sterling Hill, en el estado de New Jersey, EEUU, se han hallado grandes cristales de 7 metros de longitud de Rodonita, asociados con Calcita, Willemita y Franklinita.

La distribución de cristales exóticos ocurre en todo el mundo. En Uruguay fue encontrada una geoda de 35 toneladas de peso y con medidas aproximadas de 10 m x 5 m x 3 m, de las que se conservan grandes fragmentos, con un peso de 200 kg hoy en día en el Museo Nacional de Historia Natural de París. Este es el único museo del mundo que ha tenido como objetivo claro constituir una colección de cristales métricos, pensando en la imperiosa necesidad de conservar una muestra representativa para las futuras generaciones. La colección comprende 78 piezas principales, de las cuales las más importantes son:

- 40 Cuarzos de 200 a 2000 kg.
- Dos Topacios azules de 200 y 250 kg.
- Un Berilo rosado de 280 kg.
- Un Berilo azul de 260 kg.
- Un Apatito azul de 60 kg.
- Una mica de 220 kg.

A continuación se describen características de algunas de las más importantes piezas.

- Cuarzo hialino, con buen grado de transparencia (2.000 , 1.100, y 670 kg). Con Turmalina incluida (300, 280 y 140 kg).

- Cuarzo ahumado, con aspecto oscuro interior, que le resta diafanidad (3.000, 780, 500, 410, 380, 100, 80 y 70 kg).
- Cuarzo morrión, prácticamente negro y a veces opaco (4.050, 520, 140, 120, 51 y 34 kg).
- Cuarzo, variedad Amatista, de color violeta a morado ó lila (2.500, 800, 370, 330, y 15 kg). bipyramidal y bien cristalizado (720, 635, 400, 300, 300, y 200 kg).
- Microclina, variedad Amazonita (680, 450, 190, 170 y 50kg). (Cristaux Geants - Exposition , 1983: 1-6).

Los cristales enormes han aparecido en ó cerca de la superficie terrestre, por la acción de procesos de erosión natural que han operado por millones de años. Cuando se les encuentra pueden ser usados industrialmente como fuente de materias primas ó como piezas decorativas en colecciones y exposiciones.

Los exploradores de minerales ya saben buscar el Berilo. Éste se encuentra en las regiones de los macizos graníticos, (en Colombia no ocurre así). Se acumula en los últimos alientos de sus masas en fusión. Se reúne junto con otros gases volátiles y metales raros en los restos fósiles de los Granitos enfriados y consolidados en las profundidades. El Berilo común es muy frecuente y se encuentra en muchísimas localidades llegando a veces a alcanzar gran tamaño. Un ejemplo excepcional es el famoso cristal encontrado en Albany, condado de Oxford (Maine), que tiene 6 m de largo, 1.30 m de grueso y pesa 18 toneladas. Otro que se ha encontrado, procede de Madagascar, mide 18 m de largo, 3.5 metros de diámetro y pesa más de 4 toneladas. Un Berilo gigante en New Hampshie, midió 1.20 m de alto y 0.75 m de circunferencia. Otro de Grafton era de más de 1.20 m de alto y 0.81 en uno de sus diámetros y pesó cerca de 2.5 toneladas.

La Esmeralda es una variedad verde del Berilo. Los yacimientos colombianos han producido las gemas más bellas del mundo : a diferencia de sus primos brasileños, los prismas son nítidos y pobres en inclusiones minerales. La calidad gema es muy variable de una cantera a otra y las piedras a veces son impresionantes : la Emilia es un cristal de 6000 quilates, es decir, 1.2 kg y fue encontrada en 1969.

Las Esmeraldas colombianas se encuentran en vetas de Calcita que atraviesan rocas sedimentarias de edad cretácica (desde 136 m.a hasta 65 m.a). Durante el período cretácico, un gran mar ocupó la actual cordillera oriental colombiana. El volumen de sedimentos que dejó al retirarse fue cubierto poco a poco por nuevos sedimentos, esta vez de origen continental. Cuando se inició el período Terciario, hace 65 millones de años, grandes fuerzas tectónicas modificaron la superficie de la tierra con fallas, fracturas y pliegues.

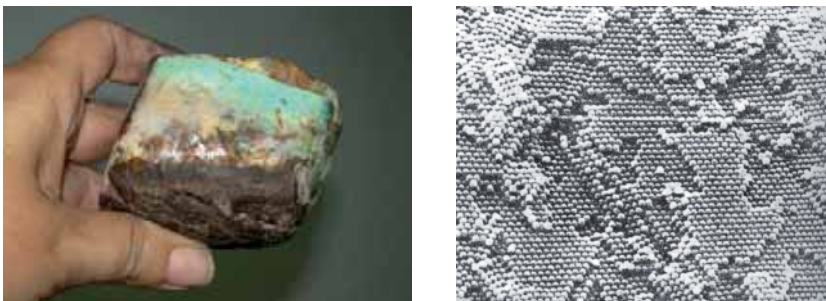
4. MINERALOIDES

El concepto de Mineral, propone “... una distribución atómica ordenada de gran alcance”. Esto significa un orden en los átomos que se mantenga regularmente en las tres dimensiones de la estructura. Sin embargo, hay cuerpos naturales en los que puede existir un orden “de poco alcance”, es decir, que no se mantiene a lo largo de las tres direcciones; podría decirse que es una estructura interna “ligeramente ó parcialmente ordenada”.

Los mineraloides pueden ser clasificados en tres categorías: geles ó coloides (el Ópalo es un ejemplo), vidrios (lechatelierita y Fulguritas) y metamórficos (Cuarzos ahumados, algunos Circones, Turmalinas, etc).

El Ópalo es un material no totalmente amorfo, que se puede expresar por la fórmula $\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$, con un contenido promedio de agua del 4 al 9%. Se consideró por mucho tiempo carente de estructura interna, pero los estudios con rayos x han mostrado que contiene una distribución ordenada de esferas de SiO_2 muy pequeñas (fig. 14).

*FIGURA 14. Ópalo. Procedencia: Queensland, Australia.
En ejemplar de mano y microfotografía de barrido, mostrando la estructura atómica interna, con un ligero orden de corto alcance. (Hurlbut y Klein, 1988: 446).*



Los mineraloides se forman en condiciones de presión y temperaturas bajas y son por lo general, sustancias formadas durante el proceso de meteorización de los materiales de la corteza terrestre. Aparecen generalmente en masas mamilares, botrioidales, estalactíticas, etc, (términos usados para expresar agregados cristalinos). La capacidad que tienen para absorber otras sustancias, explica las variaciones grandes en su composición química, actuando como esponjas.

Otro tipo de mineraloides son los “metamícticos”. Se formaron inicialmente como sólidos cristalinos, pero su estructura fue destruida por la radiación de elementos radiactivos. Por lo anterior, no difractan los rayos x y son ópticamente isótropos; no se exfolian, pero rompen con fractura concóidea. Muchos ejemplos conservan sus caras cristalinas iniciales y entonces pasan a ser pseudomorfo.

Cuando un metamíctico se calienta, su estructura cristalina se reconstruye y aumenta su densidad. Generalmente la nueva cristalización viene acompañada por la generación interna de intenso calor que pone al mineral en incandescencia. Todos los minerales metamícticos son radiactivos y esto hace suponer que la ruptura estructural resulta del bombardeo de partículas alfa emitidas por el Uranio ó el Thorio, contenido en estos minerales.

Existe un tercer tipo de mineraloides y son los vidrios naturales. El ejemplo principal es la lechatelierita ó Fulgurita, vidrio natural amorfo formado en regiones desérticas, polimorfo de SiO_2 , que ocurre por solidificación rápida de la arena silíceo, cuando ha sido impactada por una descarga eléctrica bajo una tormenta.

5. CRISTALIZACIÓN

Ante la pregunta: ¿De dónde provienen los cristales?, podemos responder por las observaciones e interpretaciones de campo y laboratorio que aquellos se han formado a partir de soluciones, fundidos, vapores y recristalización en el estado sólido. En otras palabras, un cristal es el resultado, en general, de un cambio de fase de la materia: líquido a sólido, gas a sólido ó sólido a sólido.

Como es característico de las fases fluídas (líquidos y gases), en ellos los átomos se encuentran en su mayoría desordenados (parcialmente se logran ver algunas zonas con distribución ordenada), pero al variar las condiciones de presión, temperatura y concentración, se pueden agrupar en la forma ordenada característica del estado cristalino.

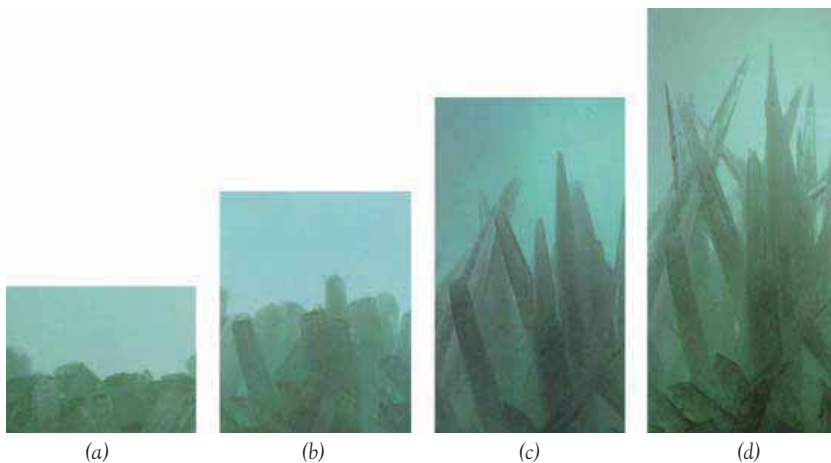
Mediante un experimento de laboratorio muy simple en el que se logran cristales de sal (NaCl : Halita) a partir de disoluciones de sal común y agua, se observa que al permitir la evaporación de agua, la disolución cada vez se va concentrando más de iones Sodio y Cloro por unidad de volumen. Esta evaporación se puede continuar hasta el punto en el cual la cantidad de agua presente no pueda retener toda la sal en solución y como consecuencia a esto, ocurre la precipitación.

Si se controla lentamente la evaporación, los iones de Cloro y Sodio se irán agrupando y construyendo la estructura del cristal.

Debido a la carga y tamaño de estos iones, se sabe que cada Sodio será rodeado por seis Cloros y cada Cloro, por seis Sodios. Este es el concepto llamado número de coordinación y resulta del número de iones que puede rodear a otro en una estructura. Para este ejemplo específico, es igual a seis.

En la medida en que el proceso continúe favorablemente (con evaporación lenta controlada ó por cambio en presión) y exista una adecuada presencia de iones, el cristal irá creciendo y adquiriendo dimensiones cada vez mayores, (Fig. 15).

FIGURA 15. Crecimiento cristalino por enfriamiento ó evaporación de una solución sobresaturada. (a): el líquido se enfría rápidamente (se insinúan formas prismáticas muy imperfectas). (b): los cristales crecen mas lentamente y se definen mejor. (c): los cristales crecen mucho más lento y empiezan a aparecer claramente las formas prismáticas delgadas y aciculares. (d): una fase mucho más lenta; los cristales son más grandes y perfectos. (Symes y Harding, 1991: 26).



Si la evaporación es muy rápida, aparecen muchos centros de cristalización, en general pequeños y sin formas bien constituidas. Son las llamadas semillas ó gérmenes de los cristales.

Los cristales pueden formarse también a partir de una solución por descenso de la temperatura o de la presión. Por ejemplo, el agua caliente disuelve más sal que la fría, y si ésta se deja enfriar, la solución se sobresaturará y la sal cristalizará. También, cuanto más alta sea la presión a la que se someta el agua, mayor será la cantidad de sal que puede mantener en solución. Por lo tanto, descendiendo la presión de una solución saturada, se llega a una sobresaturación y se formarán cristales.

Para ilustrar la formación de un cristal a partir de una masa fundida podemos considerar un ejemplo muy simple: formación de cristales de hielo por congelación del agua. Cuando la temperatura es muy baja, como ocurre en los picos de las altas montañas, las moléculas de agua, antes libres y con elevada energía cinética, propia del estado líquido se quedan quietas y van tomando un orden definido hasta constituir un sólido cristalino. La formación de las rocas ígneas intrusivas a partir del magma, nos da ejemplo también de este proceso.

La cristalización a partir de un vapor queda representada en la formación de cristales de azufre, en regiones volcánicas, en la base de las fumarolas ó en el cuello de los volcanes. También la formación de escarcha ó copos de nieve a partir de la condensación de aire saturado de vapor de agua.

5.1. CRECIMIENTO DE UN CRISTAL

Al observar ejemplos de variados y hermosos cristales, nos asalta la pregunta sobre ¿cómo pueden crecer desde formas muy pequeñas a otras muy grandes?

La primera etapa del crecimiento de un cristal se llama nucleación, es decir, la formación de un núcleo ó semilla a partir del cual el proceso de cristalización se inicia. El núcleo es la presencia de varios iones que se unen para formar el modelo estructural regular inicial de un sólido cristalino. Ellos son los productos iniciales de precipitación en ambiente acuoso ó de cristalización en una masa fundida.

Como tratamos anteriormente en el ejemplo del NaCl, el germen inicial ó nódulo resulta de la unión de los iones Sodio y Cloro combinados según un esquema regular y alternante de uno con otro para definir una red cúbica, como se ilustra en la fig. 16

FIGURA 16. Empaquetamiento del Sodio y del cloro, para formar la sustancia NaCl: Halita.



Se forman aleatoriamente muchos núcleos potenciales (como éste), pero la mayor parte de ellos no llegan al estado cristalino, porque en una solución saturada existe una tendencia de los núcleos a regresar a la solución, ó sea, ser redisueltos.

La razón de lo anterior es que, estos múltiples núcleos tienen un área superficial muy grande respecto a su volumen. La gran superficie implica que existen muchos átomos en la superficie con enlaces incompletos. En un cristal de gran tamaño, la mayor parte de los átomos son internos y por tanto la mayoría de los enlaces químicos están compensados; de ahí, su mayor permanencia ó estabilidad.

Para que un núcleo “sobreviva” a estos efectos de redisolución, debe crecer tan rápido, que se reduzca su energía superficial y por tanto su solubilidad. (la energía superficial se conoce a partir de la relación: área superficial/volumen).

Si la semilla alcanza un tamaño crítico por la acomodación rápida de capas de iones, tendrá más probabilidad de perdurar, formando un cristal mayor.

Como ya se ha dicho, la adhesión de un átomo en la superficie de un cristal, disminuye la energía superficial. La cantidad de energía liberada depende del lugar donde ocurre la adhesión.

Así, en cristales de enlaces iónicos como la Halita, la máxima energía de adhesión tiene lugar en los vértices (hay mayor número de iones no satisfechos eléctricamente), será intermedia en las aristas y mínima en el centro de las caras (aquí hay menos iones no balanceados).

Aunque se ha explicado que la cristalización ocurre por adición de iones sobre la superficie externa del cristal, según un modelo continuo y regular, hoy se sabe que no es exactamente así, pues los cristales sean naturales ó sintéticos suelen contener imperfecciones de variados tipos, como será tratado más adelante.

5.2. ORDEN INTERNO EN LOS CRISTALES

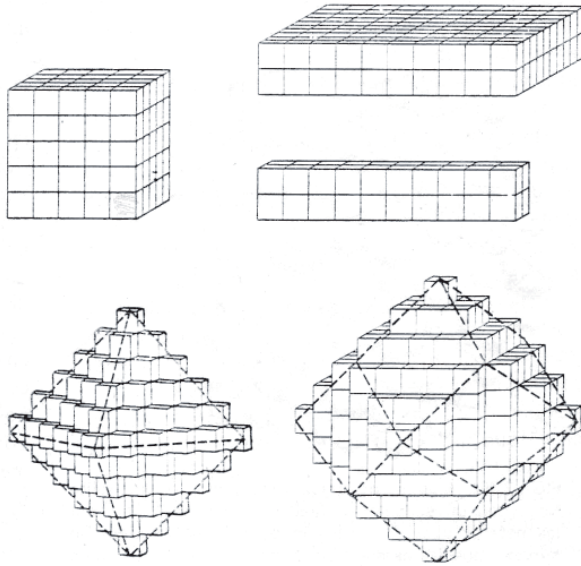
La estructura cristalina de un mineral puede considerarse como la repetición de un motivo ó grupo de átomos periódicamente en el espacio, (fig. 17).

El motivo ó grupo de átomos, también llamado “moléculas integrales” por el cristalógrafo René Hauy, tiene una cierta simetría que puede reflejarse en la forma externa del cristal. Hoy en día, el término de moléculas integrales corresponde al de “Celda unitaria”.

La Celda unidad es la mínima parte de una estructura que se puede repetir indefinidamente en las tres dimensiones, para generar todo el sistema.

La repetición ocurre de forma que se va llenando el espacio tridimensional por translación y repetición de la celda, de modo que, los alrededores de cada motivo sean idénticos.

FIGURA 17. Formación de cristales de diferentes aspectos, según sea el plan de distribución de las celdas unitarias. (Klein y Hurlbut, 1988: 21).



En dos dimensiones, una distribución ordenada puede ser:

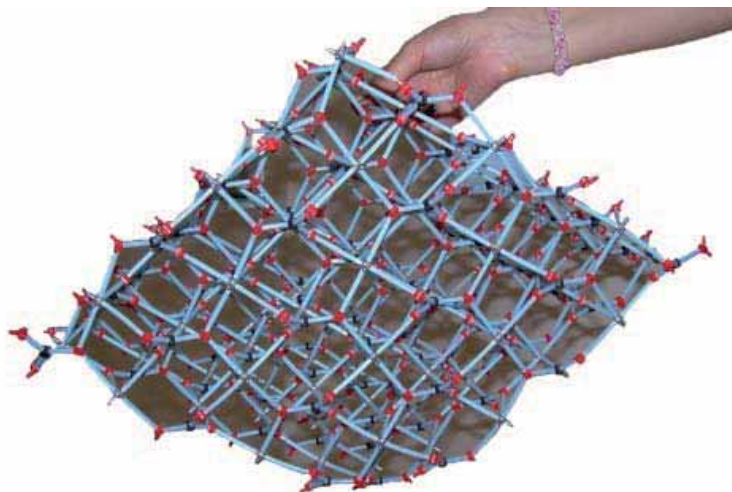


En tres dimensiones, ó sea en los cristales, la repetición puede ser de átomos, moléculas, cationes, grupos aniónicos ó combinaciones entre éstos.

El grupo Carbonato define una forma de triángulo equilátero, con el Carbono en el centro y los Oxígenos en los vértices del mismo. El ión Calcio une a estos grupos Carbonato dando un contorno a la Celda unitaria de forma romboédrica.

La fig. 18 muestra la distribución ordenada de grupos triangulares $(\text{CO}_3)^{2-}$, Carbonato e iones Calcio en la estructura Romboédrica de una Celda unitaria de Calcita (CaCO_3).

FIGURA 18. Estructura del carbonato de calcio en la forma de Calcita.



Debido a la construcción de cristales, por la relación que tienen las diferentes caras entre sí, y en ocasiones, su repetición, se puede hablar del concepto de simetría.

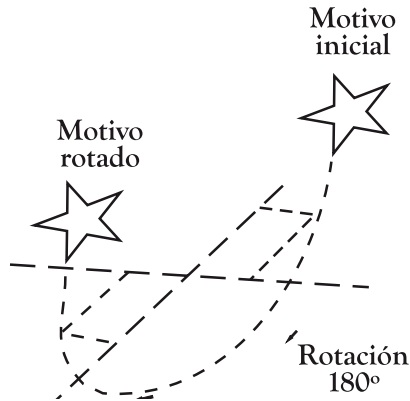
5.3. ELEMENTOS DE SIMETRÍA

Elemento de simetría es el lugar geométrico que ayuda a la visualización de la simetría de una distribución ordenada. Los ejes, planos y centro de simetría son ejemplos de los elementos de simetría.

Las operaciones de simetría correspondientes a cada uno de estos elementos son: rotación alrededor de un eje, reflexión sobre un plano e inversión alrededor de un punto.

La rotación alrededor de un eje imaginario y según un ángulo \emptyset , puede generar otro motivo ó varios motivos (fig 19).

FIGURA 19. Objeto con forma de estrella, duplicado por rotación a través de un ángulo de 180° .



5.3.1. Eje de simetría

Un eje de simetría es una línea imaginaria que pasa por el interior del cristal (no es tangencial al cristal en ninguna de sus caras, aristas ó vértices), sobre la cual se puede hacer girar el cristal y repetir éste su aspecto n veces, durante una revolución completa.

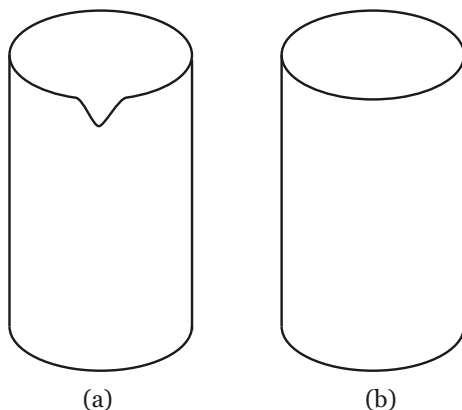
Cuando $n = 1$, quiere decir que después de haber rotado el cristal 360° alrededor del eje, no se encontró ninguna repetición en el aspecto de éste.

Los ejes de rotación pueden ser desde $n = 1$, hasta $n = \infty$, en este caso, el objeto entra en coincidencia consigo mismo para cualquier ángulo de rotación, pues la cantidad de rotación necesaria es infinitamente pequeña.

La rotación de un cilindro que tenga un dibujo (y sólo uno) enfrente del observador, si completa la rotación de 360° y sólo esta figura puede ser vista una vez: $n = 1$. (figura 20).

Si el cilindro no contiene ningún dibujo y se considera “perfecto” en la rotación sucesiva, hasta completar 360° , habrán ∞ posiciones idénticas, relacionadas por simetría: $n = \infty$.

FIGURA 20. Los dos casos extremos de simetría rotacional: cuando $n = 1$ (a) y $n = \infty$ (b)

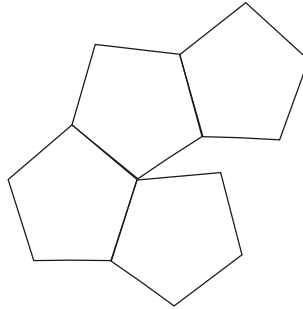


Con diferentes materiales como madera, vidrio, acrílico, cartón, etc, se pueden fabricar objetos donde se observan muchos ejes de rotación intermedios entre $n=1$ y $n=\infty$. Por ejemplo, se propone construir un modelo de madera de 24 lados, todos iguales, de modo que el eje de rotación sea $n=24$.

En los cristales la situación es diferente, pues debido al orden interno de ellos, no se encuentra sino la posibilidad de ejes Monarios ($\emptyset = 360^\circ$), Binarios ($\emptyset = 180^\circ$), Ternarios ($\emptyset = 120^\circ$), Cuaternarios ($\emptyset = 90^\circ$) y Senarios ($\emptyset = 60^\circ$)

Puede notarse que no se han incluido los ejes de orden cinco ó de simetría pentagonal, pues como puede ser comprendido con un esquema muy simple (en dos dimensiones) en la fig. 21, la acomodación de celdas de este tipo de manera continua, unas con otras, no permite llenar el espacio tridimensional (condición que es indispensable para la estabilidad del cristal) y por el contrario se van generando grandes vacíos que no pueden ser llenados con otras unidades idénticas, razón por la cual el cristal no puede formarse. Por esta misma razón, los ejes de orden superior al grado seis, tampoco existen en los cristales naturales.

FIGURA 21. Inexistencia de un eje de simetría pentagonal.



Si se trata de cubrir una superficie con unidades, todas iguales, de forma pentagonal, no es posible llenar toda el área. Los espacios vacíos son tan grandes, que desestabilizan el cristal.

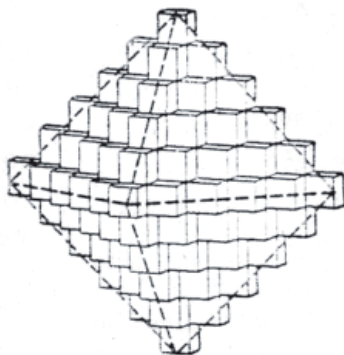
Al tratar de llenar una superficie con unidades Hexagonales, notamos que el espacio puede ser totalmente cubierto, como si se tratara de colocar un piso nuevo a un salón con baldosas de forma Hexagonal regular cada una. Igual ocurre en las estructuras cristalinas, pero ya debe pensarse en un esquema tridimensional.

Las celdas se van colocando una enseguida de la otra, cubriendo completamente el espacio en tres dimensiones.

Así, entendemos que el empaquetamiento al interior del cristal es completo, pero surge la pregunta de cómo quedará finalmente delimitado el cristal cuando el proceso haya terminado, pues como se aprecia en la figura, los contornos no son lineales, sino que van mostrando la forma periférica individual de las celdas.

Lo anterior es perfectamente comprensible a la escala atómica, pero la realidad del cristal es otra. Al tocar con nuestras manos, las superficies externas de sus caras, las sentimos lisas y continuas, debido al poder de sensibilidad que tiene el tacto, más si pudiéramos observar estas superficies con un equipo amplificador de alto poder, notaríamos las irregularidades ya explicadas (fig. 22).

FIGURA 22. "Edificio cristalino" con forma octaédrica, logrado con una cierta distribución de celdas unitarias cúbicas. (Klein y Hurlbut, 1988: 21).
Observe los peldaños ó escalones, que resultan exteriormente.



Para encontrar los ejes de rotación en un cristal, basta hacerlo girar sobre una línea imaginaria propuesta y permitiéndole una rotación de 360° (completa), observar cuántas veces se repite el mismo aspecto del cristal en el giro completo.

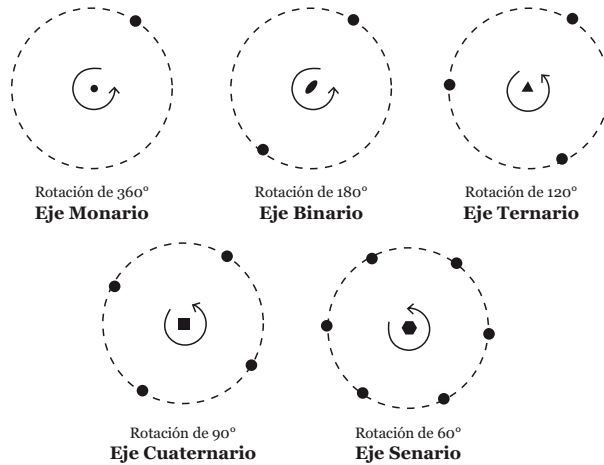
Esta operación generalmente se puede hacer frente a nuestros ojos, cuidando de mantener el cristal, con el posible eje, bien vertical (condición necesaria para mantener igualdad en tamaño, forma y posición de las caras elegidas).

En ocasiones resulta más cómodo y práctico mirar el cristal en planta (desde arriba), pues así aparecen más fácilmente a nuestros ojos, los diversos ejes presentes, por la repetición de las caras de forma simétrica.

La fig. 23 ilustra los ejes de simetría, visualizados en planta, con los puntos respectivos a esos ejes, puestos sobre una circunferencia.

Nótese que en el punto central de cada dibujo se muestra la traza de cada uno de estos ejes: un punto, para un eje Monario; un óvalo, para un eje Binario; un triángulo equilátero, para un eje Ternario; un cuadrado, para un eje Cuaternario y, finalmente, un hexágono regular, para un eje Senario.

Figura 23. Ejes de simetría de un cristal, vistos en planta (desde arriba).



Sobre la circunferencia se han colocado las figuras respectivas a cada caso, por ejemplo: dos figuras, a 180° una de la otra, para el caso Binario; cuatro figuras a 90° una de la otra, para el caso Cuaternario, y así respectivamente.

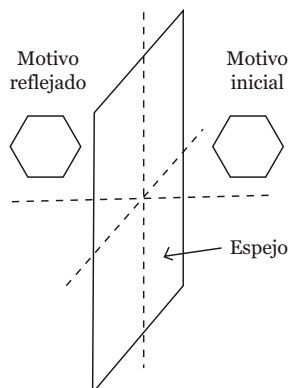
Como regla general, los ejes de simetría pueden buscarse en los cristales en las siguientes partes: en los centros de caras opuestas, en mitad de aristas opuestas, ó entre vértices opuestos (debe recordarse que el eje siempre atraviesa el cristal por su interior y jamás es tangencial a él). Puede darse el caso de un eje que empiece en vértice y salga por centro de cara.

5.3.2. Plano de simetría

Otro elemento de simetría, llamado Plano de simetría, produce mediante la operación de reflexión, una imagen igual a la primera, como si él plano fuera un espejo (fig. 24).

El motivo que se refleja es el opuesto al motivo original y jamás podrán superponerse entre sí. Es la misma relación que existe entre la mano derecha y la mano izquierda y así se constituye lo que se llama un par enantiomorfo.

FIGURA 24. Imagen reflejada por un espejo: Plano de simetría.



Los planos de simetría pueden estar ó no presentes en un cristal y para buscarlos debemos mirar que superficie imaginaria puede cortar el cristal en dos partes exactamente iguales (recordar la condición relacionada con los aspectos de tamaño, forma y posición de cada parte del cristal).

Los planos pueden pasar por aristas ó cortarlas en su punto medio, pueden pasar por vértices ó cortar las caras en su mitad.

5.3.3. Centro de simetría

Un tercer elemento de simetría es el Centro de simetría y está relacionado con la operación de inversión. Si desde un punto cualquiera de la superficie de un cristal hacemos pasar una línea imaginaria que atraviese el cristal por su centro, y dicha línea al salir del cristal, por su extremo opuesto, toca otro punto idéntico al primero, decimos que el cristal tiene Centro de simetría, verificado por la inversión de dicho punto.

Nótese que en esta operación, si el punto está en la parte superior del cristal (por ejemplo, un vértice), al hacer la operación de inversión, el nuevo punto hallado, estará en la parte inferior del cristal. Esto es, precisamente invertir un punto. El procedimiento puede realizarse igualmente con caras ó aristas. La inversión también produce un par enantiomórfico.

Como una regla práctica y bastante sencilla para conocer si un cristal tiene Centro de simetría, basta colocarlo sobre una superficie horizontal (una mesa por ejemplo) en cada una de sus caras, y si en todas las posiciones, encontramos siempre una cara igual a la que está apoyado, que sea siempre paralela a la cara de apoyo en mención, diremos que existe el Centro de simetría.

Si la cara elegida tiene una figura geométrica irregular, debe mostrar inversión de la misma. Esto es, si la cara apoyada apunta hacia la izquierda del observador, la de arriba debe apuntar hacia la derecha y viceversa.

La condición anterior debe cumplirse en todas y cada una de las caras del cristal; si al menos existe una, donde esto no sea válido, el cristal no tendrá centro de simetría.

En resumen, en los cristales pueden existir varios ejes de simetría simples ó sencillos y de variados órdenes, combinados con planos de simetría y con el Centro de simetría.

También pueden, incluso junto a todo esto anterior, existir otros ejes llamados de inversión ó de giro-inversión, ya que combinan operaciones de rotación con inversión.

5.3.4. Eje de inversión

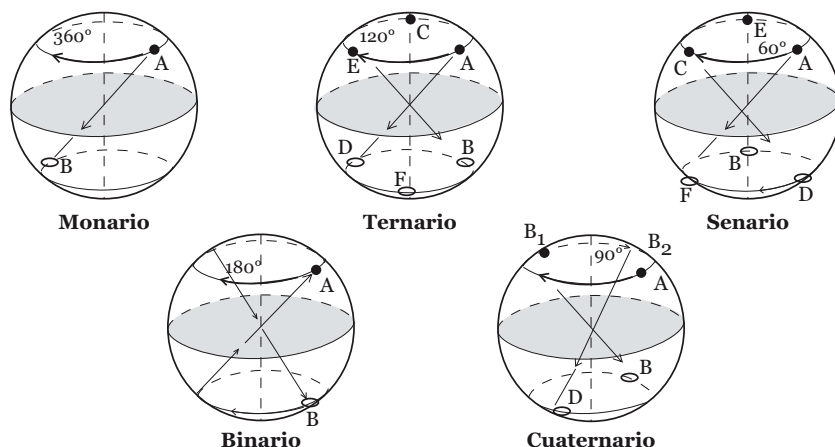
Pueden ser de los mismos órdenes de los ejes simples: Monario de inversión, Binario de inversión, Ternario de inversión, Cuaternario de inversión y Senario de inversión.

La fig. 25 ilustra las operaciones necesarias para producir los ejes de inversión.

Nótese que para esta representación se hace necesario utilizar en vez de una circunferencia (como se hizo para los ejes simples – vista en planta), una esfera que ayude a comprender volumétricamente

la localización de puntos en el cristal. Así, la parte superior de la esfera, nos hace pensar en la parte superior del cristal, y la parte inferior de la esfera, en la parte inferior del cristal.

FIGURA 25. Representación esquemática de un eje de inversión Monario ($\bar{1}$), sobre una esfera, que da idea del volumen del cristal. También se observa un $\bar{2}$, $\bar{3}$, $\bar{4}$ y $\bar{6}$.



Analicemos lo que ocurre con el eje de inversión Monario (de orden uno): Desde un punto cualquiera de la superficie del cristal, sea éste A, hacemos la operación de rotación requerida (en este caso, 360°), volviendo al punto A. Seguidamente, debemos invertir dicho punto, y al hacerlo, lo llevamos al plano inferior de la esfera, generando el punto B. Desde B, nuevamente realizamos otra operación de 360°, lo que vuelve a colocar el punto en B y seguidamente se invierte B, pasando entonces al plano superior de la esfera, llegando al punto A. Como el punto A fue el inicial de toda la operación, lo anterior significa que ya se ha realizado completamente toda la operación del eje de inversión Monario.

Veamos ahora la operación de giro-inversión de un eje Cuaternario. Desde un punto cualquiera de la superficie, sea A, rotamos 90° (y no se genera todavía ningún nuevo punto, puesto que no se ha realizado la pareja completa de rotación e inversión), e invertimos este punto imaginario, llevándolo entonces a la posición B, abajo

en la esfera. Desde B nuevamente rotamos 90° e invertimos el punto, generando uno nuevo en el plano superior ($B1$). Desde $B1$, rotamos nuevamente 90° e invertimos generando el punto D, abajo. Luego, desde D, giramos otros 90° e invertimos para producir un punto en la parte superior de la esfera. Este nuevo punto corresponde al mismo punto A inicial, lo que significa que ya se ha ejecutado el eje de giro-inversión.

Se propone al lector la realización de los ejes Binario, Ternario, y Senario.

5.4. FORMAS PARA EXPRESAR LA SIMETRÍA DE LOS CRISTALES

Corrientemente se suele expresar la simetría de un cristal, utilizando una serie de símbolos, que a manera de una notación taquigráfica, expresa el contenido de simetría de cualquier cristal. La forma primera y más sencilla de hacerlo, es la siguiente.

5.4.1. Notación simple ó sencilla

Los ejes de simetría se designan por la letra A, seguida por un subíndice n, donde n expresa el orden del eje. Así: A_4 , significa un eje de simetría Cuaternario, A_6 , es un eje de simetría Senario.

Si en el cristal existe mas de uno de estos ejes, simplemente la cantidad se expresa por medio de un coeficiente que se antepone, ejemplo, $3A_2$, significa tres ejes de orden Binario, $4A_3$, son cuatro ejes de orden Ternario, y así en general.

Los planos de simetría quedan expresados por medio de una p, de modo que si un cristal tiene cinco planos, se escribirá $5p$, si tiene tres planos, $3p$ y si carece de ellos, sencillamente, no se escribe la p.

El centro de simetría requiere el símbolo c. Sólo se usa una vez y sólo cuando este elemento esté presente en el cristal.

5.4.2. Notación Hermann Mauguin

Surgió después de la notación simple y recibió este nombre en honor a su inventor. Es universalmente empleada, incluso más que la simple, por presentar ventajas claras, como se verá posteriormente.

Para expresar los ejes de simetría sencillos ó de inversión, se emplean números, en vez de letras, por ejemplo: 1, significa un eje Monario, 2, un Binario, 3, un Ternario, 4, un Cuaternario y 6, un Senario.

Si los ejes son de inversión, para diferenciarlos, se les coloca una raya encima y se lee “barra” y el número a continuación. Ejemplos: $\bar{1}$, es un eje de inversión Monario, $\bar{2}$, es un eje de inversión Binario, $\bar{3}$, es un eje de inversión Ternario, $\bar{4}$, es un eje de inversión Cuaternario y $\bar{6}$, es un eje de inversión Senario.

Si el cristal posee varios ejes de inversión, el problema de la cantidad se resuelve por medio de un sistema convencional propuesto, como se verá más adelante.

Los Planos de simetría se designan por una m minúscula. Si existen en el cristal planos de simetría perpendiculares a cualquiera de los ejes, el símbolo se expresa en forma de quebrado ó fraccionario, por ejemplo: $2/m$, indica Plano de simetría perpendicular al eje Binario, $4/m$ indica Plano de simetría perpendicular al eje Cuaternario; $6/m$, indica Plano de simetría perpendicular al eje Senario, y así sucesivamente.

Como se dijo antes, el problema de la cantidad, queda definido por convención.

El Centro de simetría no tiene ningún símbolo en especial. Si existe en el cristal, queda implícitamente expresado en los símbolos que expresen ejes de simetría impares y sean de inversión, es decir, $\bar{1}$ y $\bar{3}$ y en los ejes simples de simetría par, que tengan planos de

simetría perpendicular, esto es, $2/m$, $4/m$ y $6/m$. La explicación y demostración se tratará con las proyecciones ortogonales.

Un cristal por tanto que tenga la siguiente simetría: un eje Cuaternario, cuatro ejes Binarios, cinco Planos de simetría y centro, se expresa, en notación simple como: $A_4, 4A_2, 5P, C$, y en su notación Hermann Mauguin: $4/m 2/m 2/m$ (Consulte más adelante las convenciones para el sistema tetragonal).

Obsérvese que los ejes de simetría van primero en la notación sencilla y en forma decreciente se van citando, desde aquellos de orden superior, descendiendo a los de orden inferior (van primero los Cuaternarios y luego los Binarios). Enseguida se colocan los planos y por último el Centro de simetría. Todos los elementos se separan unos de otros por medio de comas.

Esta simetría también puede expresarse con los símbolos de Hermann Mauguin. Para hacer la conversión, es necesario conocer las convenciones. Antes de citarlas, debemos saber que en la simetría de todo cristal siempre hay un elemento que nos indique a qué sistema cristalino pertenece dicho cristal.

Estos elementos son: en el sistema Cúbico ó Isométrico, la presencia de cuatro ejes Ternarios, caracteriza al sistema.

En el sistema Tetragonal, la existencia de un eje Cuaternario.

En el sistema Hexagonal, división Hexagonal, un eje Senario y en la división Romboédrica, un eje Ternario.

El sistema Rómbico u Ortorrómbico queda definido por tres ejes Binarios.

El Monoclínico, por un eje Binario.

El Triclínico sólo puede poseer centro ó los cristales no tienen nada de simetría.

Según lo anterior, el ejemplo: $A_4, 4A_2, 5_p, C$, pertenece al sistema tetragonal.

5.5. CONVENCIONES PARA EXPRESAR LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN

Algunos cristales tienen tantos elementos de simetría (los del sistema cúbico son los de más alta simetría) que el símbolo de su expresión sencilla puede contener hasta cinco partes, por ejemplo: $3A_4, 4A_3, 6A_2, 9p, C$.

En la expresión Hermann Mauguin (H.M) como máximo el símbolo contiene tres partes que las llamaremos: A, B y C, siendo A, la primera parte, B, la segunda y C, la tercera. Veamos entonces a continuación, según la convención, a qué se refiere cada una de estas partes.

5.5.1. Sistema Cúbico ó Isométrico

A- La primera parte del símbolo hace referencia a tres ejes de orden Cuaternario ó Binario. Puede escribirse entonces como: $4/m, \bar{4}, 4$ ó $2/m, 2$.

Cada uno de estos símbolos opcionales se usará de acuerdo a la simetría que tenga el cristal, por ejemplo: si el cristal posee ejes Cuaternarios de inversión, se escoge el $\bar{4}$. Si los ejes son Cuaternarios simples y tienen además Plano de simetría perpendicular, se escoge $4/m$. Si el cristal posee tres ejes Binarios sencillos, el símbolo escogido será 2 , y así sucesivamente.

B- La segunda parte se refiere a cuatro elementos de orden Ternario. Puede escribirse: $\bar{3}$ ó 3 (estos ejes nunca tienen planos

de simetría perpendicular, por eso la expresión no puede ser como fraccionario).

Si el cristal tiene ejes Ternarios de inversión, se elige el $\bar{3}$, y si los tiene Ternarios simples, se escoge 3.

C- La tercera parte se refiere a seis elementos de orden Binario: $6A_2$. Los elementos Binarios pueden ser ejes simples ó planos de simetría (un Plano de simetría es un caso particular de elemento Binario, pues duplica una imagen).

El símbolo puede escribirse: $2/m$, 2 ó m , según sean: ejes Binarios con Plano de simetría perpendicular, ejes Binarios sin planos perpendiculares ó planos de simetría.

Esta parte puede estar ausente.

Para construir una simetría del sistema Cúbico, se toma un símbolo de cada una de las partes, cuidando que ellas sean entre sí compatibles (es decir, que no se contradigan), por ejemplo: $4/m \bar{3}$ $2/m$; $2/m \bar{3}$; $\bar{4} 3 2$.

No existen las simetrías: $4/m 3 2$; $2/m 3$; $2 \bar{3}$ (se propone al lector encontrar las razones).

Se reconoce que una simetría pertenece al sistema Cúbico ó Isométrico, por tener en la segunda parte del símbolo un elemento de orden Ternario.

5.5.2. Sistema Tetragonal

A- La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden Cuaternario. Puede escribirse: $4/m$, $\bar{4}$ ó 4 .

B- La segunda parte se refiere a dos elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m$, 2 ó m .

C- La tercera parte se refiere a dos elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m$, 2 ó m .

Son simetrías del sistema tetragonal: $4/m\ 2/m\ 2/m$; $4\ 2\ 2$; $4\ mm$; $\bar{4}$; 4 .

Las dos últimas partes del símbolo pueden estar ausentes y se reconoce la simetría del sistema Tetragonal, porque la primera parte del símbolo es de orden Cuaternario.

5.5.3. Sistema Hexagonal

División Hexagonal

A- La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden Senario. Puede ser: $6/m$, $\bar{6}$ ó 6 .

B- La segunda parte se refiere a tres elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m$, 2 ó m .

C- La tercera parte se refiere a tres elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m$, 2 ó m .

Son simetrías del sistema Hexagonal, división Hexagonal: $6/m\ 2/m\ 2/m$; $\bar{6}\ 2\ m$; $6\ 2\ 2$.

La segunda y tercera parte del símbolo pueden estar ausentes. Se reconoce una simetría del sistema Hexagonal - división Hexagonal, porque la primera parte hace referencia a un elemento de orden seis.

5.5.4. División Romboédrica

A- La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden tres. Puede ser $\bar{3}$ ó 3 .

B- La segunda parte se refiere a tres elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m\ 2$ ó m .

C- La tercera parte del símbolo se refiere a tres elementos de orden Binario. Puede escribirse: $2/m$, 2 ó m .

La segunda y tercera parte pueden estar ausentes. Pueden haber simetrías de uno, dos ó tres términos.

Son simetrías del sistema Hexagonal - división Romboédrica: $\bar{3}$
 $2/m$; $3 2$; 3 .

Se reconoce una simetría del sistema Hexagonal - división Romboédrica, porque la primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden tres.

5.5.5. Sistema Rómbico u Ortorrómbico

A- La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden Binario. Puede ser: $2/m$, 2 ó m .

B- La segunda parte del símbolo se refiere a un elemento de orden Binario. Puede ser: $2/m$, 2 ó m .

C- La tercera parte del símbolo se refiere a un elemento de orden Binario. Puede ser: $2/m$, 2 ó m .

Ninguna de las tres partes del símbolo puede estar ausente.

Son simetrías del sistema Rómbico: $2/m 2/m 2/m$; $2 2 2$; $2 m m$.

Se reconoce una simetría del sistema Rómbico porque tiene tres partes y todas son de simetría Binaria (ejes Binarios ó planos).

5.5.6. Sistema Monoclínico

A- La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento Binario. Puede ser: $2/m$, 2 ó m .

B- No existe segunda parte.

C· No existe tercera parte.

Son ejemplos de simetrías monoclinicas: $2/m$; 2 ; m .

Se reconoce una simetría del sistema Monoclínico, porque su símbolo sólo tiene una parte y es de simetría Binaria.

5.5.7. Sistema Triclínico

A· La primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden Monario. El cristal puede tener centro ó no tener nada de simetría. Puede escribirse $\bar{1}$ ó 1 .

B· No existe segunda parte.

C· No existe tercera parte.

Son ejemplos de simetrías triclínicas: $\bar{1}$, 1 .

Se reconoce una simetría del sistema Triclínico porque su símbolo consta de una sola parte y es de simetría Monaria

Antes de proceder a hacer las conversiones de simetrías, es necesario conocer algunas equivalencias e implicaciones entre los diferentes elementos de simetría, que serán demostradas posteriormente por el método de proyecciones ortogonales. Estas son:

5.6 EQUIVALENCIAS DE LOS EJES DE INVERSIÓN

- Un Eje de inversión Monario equivale a Centro de simetría.
 $\bar{1} = C$.
- Un Eje de inversión Binario equivale a un Plano de simetría.
 $\bar{2} = m$.

- Un Eje de inversión Ternario equivale a un Eje Ternario simple más Centro de simetría. $\bar{3} = 3 + C$.
- Un Eje de inversión Cuaternario incluye un Eje Binario simple y además el cristal no posee Centro de simetría.
- Un Eje de inversión Senario equivale a un Eje Ternario simple, que tiene además Plano de simetría perpendicular. $\bar{6} = 3/m$.

5.7. SÍMBOLOS QUE IMPLICAN LA EXISTENCIA DE CENTRO DE SIMETRÍA

Son cinco símbolos los que indican implícitamente que el cristal posee centro. Ellos son:

- Los ejes de inversión de orden impar: $\bar{1}$ y $\bar{3}$.
- Los ejes simples pares, que tienen Plano de simetría perpendicular ($2/m$, $4/m$, $6/m$).

5.8. EJERCICIOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN A LA NOTACIÓN SENCILLA.

1. $4/m\ 2/m\ 2/m$.

El primer paso consiste en identificar el Sistema cristalino al cual pertenece la simetría en mención. Sabemos que ésta es Tetragonal, por tener en la primera parte un elemento de orden Cuaternario, entonces se aplican las convenciones de dicho sistema.

Como $4/m$ se refiere a la primera parte, sabemos que se trata de un elemento de orden Cuaternario (leemos el numerador), con

un Plano de simetría perpendicular (leemos el denominador) y además centro.

$2/m$ se refiere a la segunda parte, y por tanto significa dos ejes Binarios, dos Planos de simetría y centro.

El otro $2/m$ se refiere a la tercera parte, significando dos ejes Binarios, dos planos de simetría y centro.

Nótese que las partes B y C son iguales, por tanto, intercambiables.

Como es posible agrupar elementos del mismo orden, la simetría final queda: $A_4, 4A_2, 5p, C$.

El centro es un elemento único en el cristal. Si existe, sólo se coloca una sola vez, C.

$$2. \bar{3} 2/m.$$

Sabemos que esta simetría es Hexagonal, división Romboédrica, porque la primera parte del símbolo es un elemento de orden Ternario. Aplicando la convención de dicho sistema, tenemos:

$$\begin{aligned}\bar{3} &= Ap_3, C. \\ 2/m &= 3A_2, 3p, C.\end{aligned}$$

El subíndice p indica en notación simple, que el Eje Ternario es de inversión.

En total quedaría $Ap_3, 3A_2, 3p, C$.

$$3. 6 m m .$$

La simetría pertenece al sistema Hexagonal – división Hexagonal, por tener elemento de orden seis en la primera parte. Aplicando la convención, tenemos:

$$6 = A_6.$$

$$m = 3p.$$

$$m = 3p.$$

En total, queda: A_6 , $6p$.

4. $2/m\ 2/m\ 2/m$.

La simetría pertenece al sistema Rómbico u ortorrómbico, por tener tres partes de simetría binaria. Aplicando la convención, queda:

$$2/m = A_2, p, C.$$

$$2/m = A_2, p, C.$$

$$2/m = A_2, p, C.$$

En total es: $3A_2$, $3p$, C .

5. $2/m\ \bar{3}$

Sabemos que esta simetría es del Sistema Cúbico ó Isométrico, porque tiene en la segunda parte elemento de orden Ternario. Aplicando la convención, tenemos:

$$2/m = 3A_2, 3p, C.$$

$$\bar{3} = 4A_3, C.$$

En total queda:

$$3A_2, 4A_3, 3p, C.$$

6. $2/m$.

Esta simetría es del sistema Monoclínico porque consta de una sola parte y es Binaria. Aplicando la convención del sistema:

$$2/m = A_2, p, C.$$

7. $\bar{1}$.

Se sabe que esta simetría es del sistema Triclínico, por poseer una sola parte y ser Monaria. Aplicando la convención, se tiene:

$$\bar{1} = c.$$

Entonces la expresión final es sólo c, Centro de simetría.

Se podría pensar que los símbolos de simetría se pueden combinar unos con otros de cualquier manera. Esto no es así, pues entre ellos debe haber compatibilidad, y si el cristal por ejemplo tiene centro, todas las partes del símbolo, deben expresarlo.

La simetría $2/m\bar{3}$, por ejemplo no es correcta, ya que la primera parte expresa centro y la segunda no. Si el cristal verdaderamente posee centro, entonces hace falta que la segunda parte sea $\bar{3}$ (y no 3). Los siguientes ejercicios quedan propuestos:

- 1	- 3 2	- 4 3 2
- 2	- 3 m	- $\bar{4}$ 3 m
- $\bar{2}$	- 4	- 6
- 2 2 2	- $\bar{4}$	- $\bar{6}$
- 2 m m	- 4 2 2	- 6 2 2
- 2 3	- 4/m	- 6/m
- $\bar{3}$	- 4 m m	- $\bar{6}$ 2 m
- 3	- $\bar{4}$ 2 m	- 6/m 2/m 2/m

5.9. EJERCICIOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA NOTACIÓN SIMPLE A LA NOTACIÓN HERMANN MAUGUIN.

$$1.A_6, 6A_2, 7p, C.$$

En este caso se procede de forma semejante, investigando primero que todo, a qué sistema pertenece la simetría. Sabemos que es

Hexagonal, porque se tiene un elemento de orden seis. Como ya se dijo anteriormente, el propósito es expresar la simetría del cristal en un símbolo que máximo tenga tres partes: A B C.

Aplicando la convención del sistema Hexagonal, sabemos que la primera parte del símbolo hace referencia a un elemento de orden Senario, en nuestro caso es A_6 , por eso, simplemente escribimos 6, para expresar este eje.

La segunda y tercera parte del símbolo se refiere a tres elementos de orden Binario cada una. Tenemos seis ejes Binarios que los podemos repartir en estas dos partes, quedando entonces: 2 2.

Enseguida debemos expresar los planos que son siete.

Si recordamos cuantos elementos hay en cada parte, comprendemos que la suma de ellos debe ser siete (uno en la primera, tres en la segunda y tres en la tercera). La forma de escribir estos planos es entonces, escribir como fraccionarios los números que ya teníamos: $6/m \ 2/m \ 2/m$.

Al revisar esta expresión, vemos que todos son elementos pares, con Plano de simetría perpendicular, por tanto, expresan todos el centro. Este es el símbolo final.

$$2. \ 3A_2, \ 2p.$$

Por los tres ejes Binarios presentes, pensamos que la simetría es Rómbica. Si recordamos que cada parte sólo hace referencia a un elemento, podemos escribir la expresión: 2 2 2, y con esto estarán indicados los $3A_2$.

Ahora, para expresar los dos planos, no podemos convertir ninguna de estas partes a fraccionarios, por varias razones: sólo dos partes tendrían plano (por ejemplo: $2/m \ 2/m \ 2$) y además al hacerlo, estaría implicando centro (en los dos primeros términos), cosa que no existe.

Por tanto, la conclusión es que esta simetría no se puede expresar en el sistema Rómbico. Debemos pensar entonces en otro sistema, y para ello, hacer uso de las equivalencias de los ejes de inversión, ya enunciadas.

Al revisar estas equivalencias, para decidir cuál puede usarse, encontramos que es la cuarta, ya que incluye eje Binario, y en la simetría no hay centro. Estamos pensando entonces en el sistema Tetragonal y recordando entonces el número de elementos de cada parte, vemos que en la primera hay uno Cuaternario y en la segunda y tercera, de a dos Binarios.

Por tanto, si tomamos uno de estos ejes Binarios y lo convertimos en Cuaternario de inversión, quedaría en la primera parte: $\bar{4}$. Nos quedan entonces dos ejes Binarios que pueden ocupar el segundo lugar: 2. Los restantes dos planos quedan en la tercera parte, como: m.

La expresión final sería: $\bar{4} 2 m$.

3. $A_2, 2p$.

En la simetría, encontramos un eje Binario y por esto podemos pensar en el sistema Monoclínico. Este único eje Binario se puede simbolizar con 2.

Para tratar de expresar los dos planos de simetría, no puede hacerse colocando la expresión en forma de quebrado $2/m$ por varias razones: recordemos que al hacerlo, estamos implicando Centro de simetría y éste no existe.

Además, en esa expresión, sólo se mostraría un plano y existen dos. Por otro lado, el sistema Monoclínico sólo tiene una parte en su símbolo, por tanto, no podría expresarse el otro plano.

Llegamos entonces a la conclusión que no es posible que esta simetría sea Monoclínica; debemos pensar en otro sistema.

Luego de revisar las posibilidades encontramos que es probable el sistema Rómbico, porque debe tener tres elementos de simetría Binaria, que en efecto están (pues los planos son casos particulares de simetría Binaria).

Como cada una de las partes del símbolo en este sistema hablan de un elemento Binario y tienen además que estar presentes las tres partes, entonces escribimos 2 para el eje Binario, m para uno de los planos y m para el otro plano, quedando entonces la expresión: 2 m m .

4. A_3 , $3A_2$, $3p$, C.

Ubicamos esta simetría del sistema Hexagonal, división Romboédrica, por el eje Ternario.

La primera parte del símbolo en este sistema hace mención de un elemento Ternario, entonces escribimos 3. La segunda parte del símbolo en este sistema se refiere a tres elementos Binarios, entonces escribimos 2 y con esto quedan expresados. La tercera parte del símbolo se refiere a otros tres elementos Binarios. Podríamos pensar en los tres planos, colocando una m en esta parte. Hace falta expresar el Centro de simetría, y como ya sabemos, debe estar en todas las partes del símbolo. Hasta ahora el símbolo es 3 2 m.

Para que la primera parte exprese centro, tendrá que ser $\bar{3}$. Para que la segunda parte exprese centro, tendrá que ser $2/m$, y así quedan indicados en esta parte los tres planos de simetría.

Lo anterior significa que no se necesita la tercera parte “m”. La “m” en el tercer lugar no puede aceptarse, pues no expresaría jamás el centro.

La conclusión a la que llegamos es que el símbolo no debe tener tercera parte. Los tres planos, más bien deben ser acomodados en

alguna de las dos primeras partes. La única parte que los admite, es la segunda (por cantidad), colocando entonces el 2 en forma de quebrado: $2/m$.

Falta indicar el centro. En la segunda parte ya está implícito, y para que la primera también lo muestre, se expresa como $\bar{3}$, quedando entonces la expresión final: $\bar{3} 2/m$

5. C.

El cristal dado, sólo tiene elemento de simetría: centro, por tanto el sistema al que pertenece la simetría es Triclínico.

Recordemos que en el sistema Triclínico, el símbolo sólo tiene una sola parte, y es de tipo Monario. Convirtiendo centro a expresión Hermann Mauguin, es $\bar{1}$. Por tanto, la expresión final es $\bar{1}$.

6. $3A_2, 4A_3$.

Sabemos que esta simetría es Cúbica por tener cuatro elementos de orden Ternario. Aplicando las convenciones del sistema, la primera parte hace referencia a tres elementos Binarios, son los $3A_2$. Si escribimos 2, estos ejes quedan expresados.

La segunda parte del símbolo hace referencia a cuatro elementos Ternarios, son los $4A_3$. Si escribimos 3, quedan expresados. Por tanto, la expresión final es: $2 3$.

Sólo existen 32 formas reales en los cristales de combinar los diferentes elementos de simetría y ellos dan lugar a las 32 Clases Cristalográficas ó Cristalinas.

Los siguientes ejercicios quedan propuestos.

- A_1
- A_2

- $A_4, 4A_2$
- A_4, p, C

- p	- A ₄ , p
- 3A ₂	- A ₄ , 4A ₂ , 5p, C
- A ₂ , p, C	- 3A ₄ , 4A ₃ , 6A ₂
- 3A ₂ , 3P, C	- 3Ap ₄ , 4A ₃ , 6p
- 3A ₂ , 4A ₃ , 3p, C	- A ₆
- A ₃	- Ap ₆
- Ap ³	- A ₆ , 6A ₂
- A ₃ , 3A ₂	- A ₆ , p, C
- A ₃ , 3p	- A ₆ , 6p
- A ₄	- Ap ₆ , 3A ₂ , 3p
- Ap ₄	- 3A ₄ , 4A ₃ , 6A ₂ , 9P, C.

5.10. PROYECCIONES ORTOGONALES

Es un método gráfico que permite representar parcialmente la simetría de un cristal, y particularmente va a ser útil en la comprensión de algunos enunciados que se han propuesto, como son: las equivalencias de los ejes de inversión y la implicación del centro en algunos símbolos.

Sobre una circunferencia, que en adelante representa lo que llamaremos el Plano de proyección, podemos ubicar puntos que representan puntos reales del cristal, y mediante rotaciones y reflexiones apropiadas, lograremos visualizar con claridad el elemento de simetría en mención.

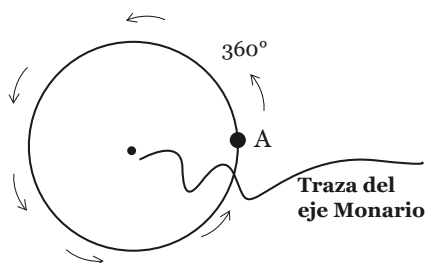
Veamos en principio, cómo representar los ejes de simetría sencillos, cuando éstos son perpendiculares al Plano de proyección.

Si el eje es Monario, representaremos su traza por un punto situado en todo el centro de la circunferencia (es como si estuviéramos viendo en planta la proyección (fig. 26).

5.10.1. Representación ortogonal de un eje Monario simple.

A partir de un punto inicial, llamado A, y decidiendo el sentido de rotación contrario a las manecillas del reloj, producimos desde dicho punto un giro de 360° , llegando nuevamente a la posición inicial. Esto significa que la operación ha terminado, quedando entonces la representación del eje Monario consistente en sólo un punto ubicado en cualquier lugar de la circunferencia.

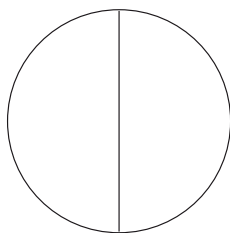
FIGURA 26. Representación ortogonal de un eje Monario, perpendicular al Plano de proyección.



5.10.2. Representación ortogonal de un eje Binario simple.

Para representar un eje Binario simple podemos dividir la circunferencia en dos partes iguales (esto ayudará a la correcta ubicación de puntos (fig. 27)).

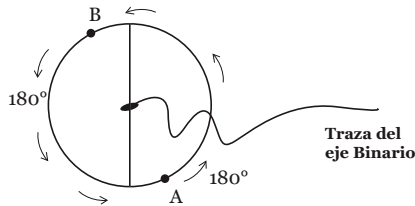
FIGURA 27. Circunferencia de proyección, dividida en dos hemisferios, para la representación de un eje Binario.



Si partimos de un punto cualquiera sobre la circunferencia (punto A), y rotamos en este caso 180° , por la existencia de dicho eje Binario se produce un punto B, simétrico con A. Si desde B continuamos la

rotación, veremos que al girar 180° se vuelve al punto A de partida (esto significa que ya se ha terminado la operación – fig. 28).

FIGURA 28. Representación ortogonal de un eje Binario simple, perpendicular al Plano de proyección.



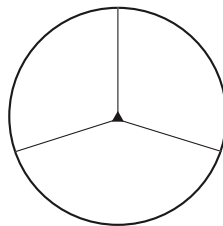
La representación entonces de un eje Binario normal al Plano de proyección, consiste en dos puntos situados a 180° uno del otro.

La traza del eje se puede representar por un óvalo en el centro de la circunferencia.

5.10.3. Representación ortogonal de un eje Ternario simple.

Para representar un eje Ternario, dividimos la circunferencia en tres partes iguales, a manera de porciones ó cascos. La traza del eje Ternario se simboliza por un triángulo equilátero ubicado en el centro de la circunferencia, (fig. 29).

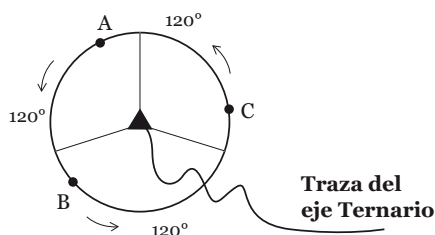
FIGURA 29. Circunferencia de proyección dividida en tres porciones ó cascos iguales, para la representación de una simetría ternaria.



Desde el punto A inicial, rotamos 120° , generando un segundo punto llamado B. Desde éste continuamos la rotación, generando un tercer punto llamado C. Si desde C, rotamos de nuevo, llegamos al punto de partida A, significando esto que ya se ha terminado la operación.

Queda entonces la representación de un eje Ternario, como tres puntos ubicados a 120° uno del otro (fig. 30).

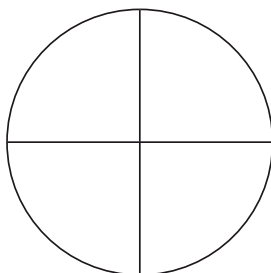
FIGURA 30. Representación ortogonal de un eje Ternario, simple, perpendicular al Plano de proyección.



5.10.4. Representación ortogonal de un eje Cuaternario simple.

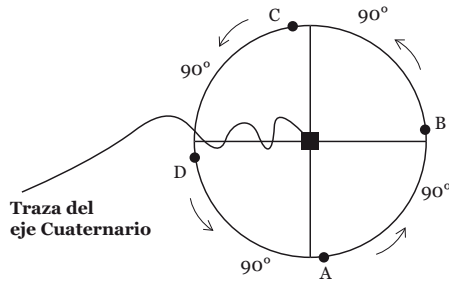
Para mostrar un eje Cuaternario perpendicular al plano del dibujo, dividimos el espacio interior en cuadrantes para la mejor localización de los puntos (fig. 31).

FIGURA 31. Circunferencia de proyección dividida en cuadrantes iguales, para la representación de una simetría cuaternaria.



Desde A, punto inicial, rotamos 90° en sentido contrario a las manecillas del reloj, llegando al punto simétrico B. Desde B, otro giro de 90° , genera el tercer punto llamado C, y desde aquí, nuevamente una rotación de 90° genera el cuarto punto simétrico, relacionado por este eje de simetría, llamado D. Al rotar 90° desde D, se llega al punto de partida A, significando que ya se ha completado la operación, (fig. 32).

FIGURA 32. Representación ortogonal de un eje Cuaternario simple, perpendicular al Plano de proyección.



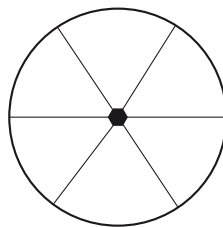
La representación entonces del eje Cuaternario simple consiste en cuatro puntos simétricos situados a 90° uno del otro. La traza de dicho eje se representa por un cuadrado en el centro de la circunferencia.

5.10.5. Representación ortogonal de un eje Senario simple.

La traza de un eje Senario perpendicular al plano del dibujo (Plano de proyección) se representa por un hexágono regular situado en el centro de la circunferencia.

Dividimos el espacio interior en seis espacios iguales, para una buena localización de los puntos simétricos (fig. 33).

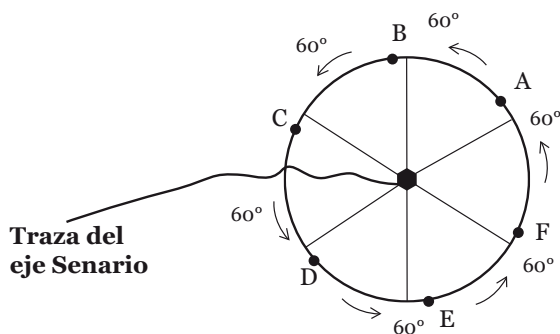
FIGURA 33. Circunferencia de proyección dividida en seis cascos iguales, para la representación de una simetría senaria.



A partir del punto A, giramos 60° en sentido contrario a las manecillas del reloj, encontrando el punto simétrico B. Desde B, nuevamente 60° , ubican un nuevo punto simétrico C. A partir de

C, otra vez giramos 60° , llegando al punto D. Desde D, una nueva rotación de 60° , llega al punto simétrico E. Desde E rotamos 60° , localizando el nuevo punto F, simétrico a los anteriores. Si desde F rotamos otra vez 60° , volvemos al punto A ó posición inicial, terminando con esto la operación de simetría (fig. 34).

FIGURA 34. Representación ortogonal de un eje Senario simple, perpendicular al Plano de proyección.



La representación ortogonal entonces de un eje Senario simple, consiste en seis puntos simétricos ubicados uno del otro a 60° (figura 34).

Antes de proceder con los ejes de inversión, es preciso comprender, que dada la simetría del cristal, algunos puntos se pueden ubicar por encima del Plano de proyección (puntos negros ó llenos) y otros estarán por debajo del Plano de proyección (puntos blancos ó vacíos).

Esto es como considerar que el cristal posee un Plano de simetría por su parte media, de modo que sea paralelo al Plano de proyección, reflejando entonces desde un punto arriba, otro simétrico abajo.

Recordemos que el Centro de simetría es una operación que implica la inversión, esto es, invertir un punto es pasarlo por el centro de la circunferencia al otro lado del Plano de proyección (si el punto está por encima, queda por debajo del Plano de proyección, y si está por debajo, queda por encima del Plano de proyección).

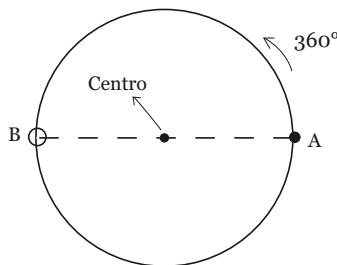
Veamos ahora entonces cómo se representan los ejes de inversión (estos ejes, igual que los anteriores, van a ser perpendiculares al Plano de proyección ó plano del dibujo).

5.10.6. Representación ortogonal de un eje Monario de inversión.

Para mostrar un eje de inversión Monario, partimos de un punto cualquiera sobre la circunferencia, y rotamos 360° en sentido contrario a las manecillas del reloj. Con este giro, volvemos a la posición de A, pero este punto no es real ó no pertenece al cristal, puesto que, como se trata de un Eje de inversión, la operación debe ser conjunta de rotación primero y luego de inversión.

Invirtiendo esta posición, se genera el punto B, al otro lado del Plano de proyección (por debajo). Desde este punto, nuevamente rotamos 360° ubicándonos en la misma posición de B, para llegar finalmente a A. El punto en B estaba por debajo, al invertirlo queda por encima, es decir, corresponde con la misma posición de partida, terminando aquí la operación (fig. 35).

FIGURA 35. Representación ortogonal de un eje de Inversión Monario, perpendicular al Plano de proyección.



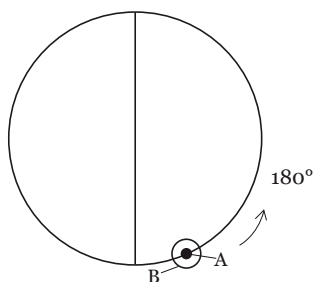
Finalmente, la operación de proyección ortogonal de un eje de inversión Monario está dada por dos puntos situados sobre la circunferencia, unidos por una línea imaginaria que pasa por el centro, tal que uno está por encima y otro por debajo del Plano de proyección (fig. 35).

5.10.7. Representación ortogonal de un Eje Binario de inversión.

Para realizar la proyección ortogonal de un Eje de inversión Binario, iniciamos desde un punto A, rotamos 180° , y desde este punto imaginario, invertimos, llegando a la posición de A, pero por debajo del Plano de proyección (punto abierto). Sea éste el punto B. Desde B, rotamos otra vez 180° por debajo e invertimos, para llegar nuevamente a la posición A inicial.

Esto significa que la operación se ha completado, quedando entonces en la proyección dos puntos (en la misma posición vistos desde arriba), uno por encima y otro por debajo del Plano de proyección (fig. 36).

FIGURA 36. Representación ortogonal de un Eje de inversión Binario, perpendicular al Plano de proyección.

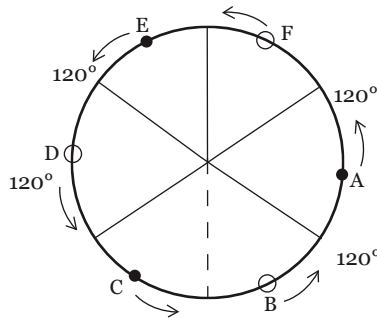


5.10.8. Representación ortogonal de un Eje de inversión Ternario.

Para la representación ortogonal de un Eje de inversión Ternario ($\bar{3}$), tomamos un punto cualquiera sobre la circunferencia (punto inicial, sea A) por encima del Plano de proyección, rotamos 120° e invertimos dicho punto, generando el segundo punto B, por debajo del Plano de proyección. Desde B, rotamos otros 120° e invertimos nuevamente, generando el punto C, por encima del Plano de proyección. Desde C, giramos otra vez 120° e invertimos,

generando el nuevo punto D, por debajo del Plano de proyección. Desde D nuevamente, y en el mismo sentido, rotamos otros 120° e invertimos, llegando al punto E, por encima del Plano de proyección. A partir de E, se giran otros 120° y se invierte, llegando al punto F, por debajo del Plano de proyección, y desde F, nuevamente otros 120° e invirtiendo, para llegar a A ó punto de partida (Fig. 37).

FIGURA 37. Representación ortogonal de un Eje de inversión Ternario, perpendicular al Plano de proyección.



Debe recordarse que la operación termina, cuando se llega al punto inicial.

Quedan entonces seis puntos en la proyección, ubicados uno del otro a 60° y alternadamente dispuestos, es decir, uno por encima y otro por debajo. Hay entonces dos ternas de puntos: tres por encima y tres por debajo del Plano de proyección (recuerde que también este eje entra perpendicular al plano del dibujo, en el punto central de la circunferencia, (Fig. 37).

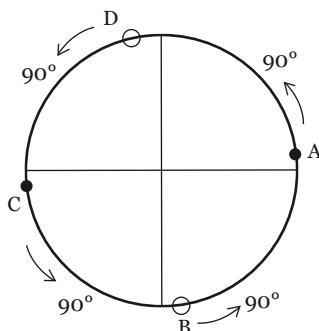
5.10.9. Representación ortogonal de un eje Cuaternario de inversión.

La operación para un Eje Cuaternario de inversión consiste en: empezando con el punto A, por debajo del Plano de proyección (da igual elegir el punto inicial por debajo ó por encima) y rotando e invirtiendo llegamos al punto B. Desde B, que está por encima del Plano de proyección, giramos de nuevo 90° e invertimos, llegando

al punto C, por debajo del Plano de proyección. A partir de C, nuevamente se giran 90° y se invierte, generando el punto D, por encima del Plano de proyección. Si desde D hacemos la misma operación, rotando 90° e invirtiendo, llegamos finalmente a la misma posición A que es el punto de partida ó inicial, terminando así la proyección.

Quedan entonces cuatro puntos situados a 90° uno del otro, dispuestos alternativamente, uno por debajo y uno por encima del Plano de proyección (fig. 38).

FIGURA 38. Representación ortogonal de un Eje de inversión Cuaternario, perpendicular al Plano de proyección.

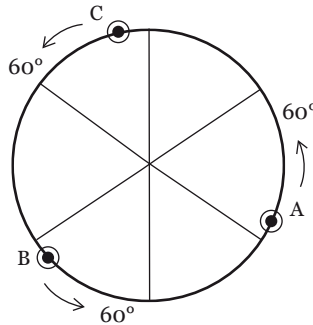


5.10.10. Representación ortogonal de un Eje Senario de inversión.

Para un $\bar{6}$, vamos a partir del punto A por debajo del Plano de proyección, rotamos 60° e invertimos dicho punto, generando el punto B, por encima del Plano de proyección. Desde B, de nuevo se giran otros 60° y se invierte, llegando al punto C, por debajo del Plano de proyección. A partir de C, otros 60° , invirtiendo y llegando por encima al punto D. Desde D, rotamos 60° de nuevo, invertimos y generamos el punto E por debajo del Plano de proyección. Desde E, giramos otra vez 60° , invertimos y generamos el nuevo punto F, por encima del Plano de proyección. Siguiendo con F, rotamos otros 60° e invertimos para llegar a la posición A (por debajo del Plano de proyección), que es el punto de partida.

Aquí termina la proyección, quedando entonces seis puntos, constituidos en dos ternas: una terna de puntos por encima y otra terna de puntos por debajo, de tal forma que se ven como la proyección en planta de unos con otros (fig. 39).

FIGURA 39. Representación ortogonal de un Eje de inversión Senario, perpendicular al Plano de proyección.



5.11. COMPROBACIÓN DE LAS EQUIVALENCIAS DE LOS EJES DE INVERSIÓN.

Las proyecciones recién realizadas permiten entender claramente el porqué de las equivalencias de los Ejes de inversión expresadas anteriormente.

- Decíamos que $\bar{1} = C$. Si vemos la proyección, observamos que los dos puntos están efectivamente relacionados por la operación del centro, pues cada uno es la inversión del otro y esto lo podemos comprobar porque están unidos por una línea imaginaria que pasa por el centro de la circunferencia, permitiendo así que uno esté arriba y otro abajo del Plano de proyección.
- El $\bar{2}$ nos muestra dos puntos simétricos: uno abajo y otro arriba del Plano de proyección, relacionados por un Plano de simetría que es paralelo al Plano de proyección. Por lo tanto el $\bar{2}$, puede decirse equivalente a dicho Plano de simetría.

- En el $\bar{3}$ vemos la existencia de un eje Ternario simple perpendicular al Plano de proyección que puede relacionar a los tres puntos por encima ó a los tres puntos por debajo del Plano de proyección.
Si observamos además que el punto, ya sea tomado por encima ó por debajo, tiene su igual al otro lado del Plano de proyección, unidos estos dos por una línea imaginaria que pase por el centro de la circunferencia, comprobamos entonces que la proyección $\bar{3}$ equivale en realidad a un eje Ternario simple más el Centro de simetría.
- Un $\bar{4}$ nos muestra cuatro puntos sobre la circunferencia, dos por encima y dos por debajo, alternativamente dispuestos, esto es, aquí vemos implícitamente la existencia de un eje Binario simple perpendicular al Plano de proyección y la no presencia de centro, ya que ninguno de los cuatro puntos tiene su igual al otro lado del Plano de proyección, unidos por una línea que pase por el centro de la circunferencia.
- Un $\bar{6}$ nos indica la existencia de un eje Ternario simple, perpendicular al Plano de proyección, y a la vez, la existencia de un Plano de simetría paralelo al Plano de proyección, porque todo punto arriba del Plano de proyección, tiene su equivalente al otro lado del Plano de proyección.

En otras palabras, lo anterior significa que realmente en la proyección se muestra un eje Ternario simple, que tiene además un Plano de simetría perpendicular a él.

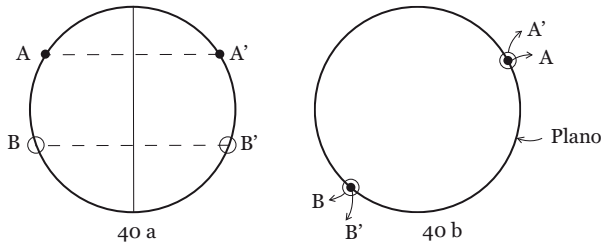
5.12. PROYECCIÓN ORTOGONAL DE PLANOS DE SIMETRÍA.

Los Planos de simetría se pueden representar por este método sólo cuando son perpendiculares ó paralelos al Plano de proyección.

Para mostrar un Plano de simetría perpendicular al plano del dibujo (Plano de proyección), tomamos un punto A cualquiera y ejecutamos la

operación del plano, esto es, dicho punto refleja uno igual a él, A' como una imagen especular al otro lado del plano, según una línea que una A y A' y que sea perpendicular a dicho plano. La distancia entre A y el plano debe ser igual a la medida entre A' y el plano (fig. 40a).

FIGURA. 40. Representación ortogonal de los planos de simetría: perpendicular al Plano de proyección (40a) y paralelo al Plano de proyección (40b).



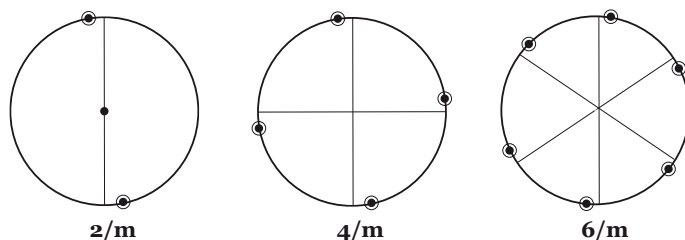
Cuando el Plano de simetría es paralelo al Plano de proyección, un punto cualquiera e la circunferencia generará su homólogo en esa misma posición, pero al otro lado del plano del dibujo, como puede apreciarse en la fig. 40b.

5.13. COMPROBACIÓN DE LA EXISTENCIA DEL CENTRO DE SIMETRÍA EN LAS NOTACIONES $2/m$, $4/m$ y $6/m$.

Si observamos detenidamente las proyecciones de los ejes de simetría simples (pares), que tienen a su vez Plano de simetría perpendicular, en todas ellas encontramos que para todo punto elegido en la proyección existe un punto igual, a 180° y unidos por una línea recta que pasa por el centro de la circunferencia, mostrando además la alternancia en su ubicación, es decir, si uno está por encima del plano, su homólogo está por debajo del plano del dibujo. Esta es la condición necesaria para la existencia del Centro de simetría.

Como ya se ha dicho antes, el número posible de combinaciones de simetría no es ilimitado. Realmente el número total de elementos de simetría y combinaciones de simetría no idénticos, es de sólo 32.

FIGURA. 41. Representación ortogonal de $2/m$, $4/m$ y $6/m$.



La tabla 1, muestra las combinaciones dispuestas en secuencia, desde la más baja a la más alta simetría rotacional. La tabla 2, muestra la distribución convencional de los sistemas y clases cristalinas.

Los 32 elementos y combinaciones de elementos posibles son idénticos a las 32 posibles clases cristalinas ó clases cristalográficas. Algunas de las 32 clases de cristales tienen características de simetría en común con otras, lo que permite agruparlas en uno de los seis sistemas cristalinos.

5.14. EJES CRISTALOGRÁFICOS

Con el propósito de dar nombre a las caras de los cristales, se hace necesaria la utilización de unos ejes de referencia ó coordenadas que sirven para ubicar en posición las respectivas formas externas del cristal. Estos son los llamados Ejes cristalográficos, que se deben tomar paralelos a aristas reales del cristal.

En general se eligen tres, con excepción del sistema Hexagonal que necesita cuatro, y en la mayoría de los casos coinciden con los ejes de simetría del cristal.

En general se nombran como: a, b y c; se interceptan en el interior del cristal (son imaginarios), y cada uno tiene su extremo positivo y su extremo negativo. Por convención, los extremos positivos se toman hacia el frente del observador, hacia su derecha y hacia arriba. Las otras posiciones serán las negativas.

TABLA 1. Los 32 elementos de simetría y sus combinaciones posibles.
(Cornélius Klein y Cornelius Hurlbut Jr., *Manual de Mineralogía*. 1998. 34p).

Simetría de rotación creciente →					
	1 $\bar{1} = C$	2 $\bar{2} = m$	3 $\bar{3}$	4 $\bar{4}$	6 $\bar{6} = 3/m$
Sólo ejes de rotación					
Sólo ejes de rotoinversión					
Combinaciones de ejes de rotación		222	32	422	622
Una rotación con plano perpendicular de simetría		$2/m$	$3/m (= \bar{6})$	$4/m$	$6/m$
Una rotación con planos paralelos de simetría		$2mm$	32	$4mm$	$6mm$
Rotoinversión con rotación y plano de simetría			$32/m$	$42m$	$62m$
Tres ejes de rotación y planos perpendiculares de simetría		$2/m 2/m 2/m$		$4/m 4/m 4/m$	$6/m 2/m 2/m$
Combinaciones de simetría adicional en diagramas isométricos		23 $2/m \bar{3}$		432 $43m$	$4/m \bar{3} 2/m$

TABLA 2. Las 32 Clases Cristalinas.
(Cornelius Klein y Cornelius Hurlbut Jr., Manual de Mineralogía. 1998. 41p).

Sistema cristalino	Clase de cristal	Sistema cristalino	Clase de cristal
Triclínico	1	Hexagonal	3
	$\bar{1}$		$\bar{3}$
Monoclínico	2		32
	m		$3m$
	$2/m$		$\bar{3}2/m$
Ortorrómico	222		6
	$mm2$		$\bar{6}$
	$2/m 2/m 2/m$		$6/m$
Tetragonal	4		622
	$\bar{4}$		$6mm$
	$4/m$	$\bar{6}m2$	
	422	$6/m 2/m 2/m$	
	$4mm$	Isométrico	23
	$\bar{4}2m$		$2/m \bar{3}$
	$4/m 2/m 2/m$		432
	$\bar{4}3m$		
	$4/m \bar{3} 2/m$		

Los ángulos formados entre los ejes se designan como: alfa, beta y gamma. Alfa está entre b y c, beta entre a y c y gamma entre a y b.

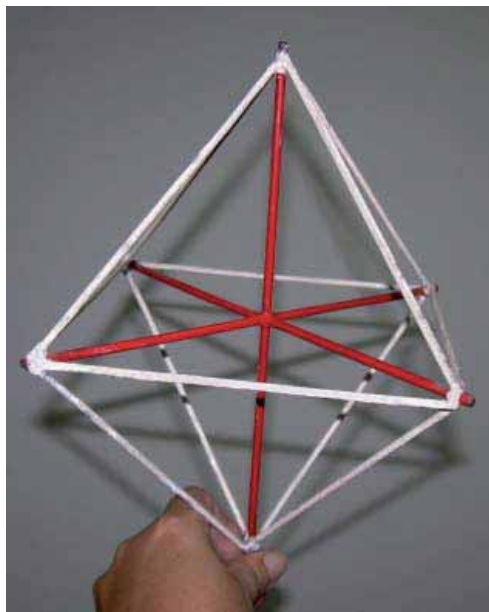
Cada uno de los sistemas cristalinos queda caracterizado por sus propios valores angulares y paramétricos, tal como se observa en la fig. 42.

De acuerdo al sistema, los ejes serán:

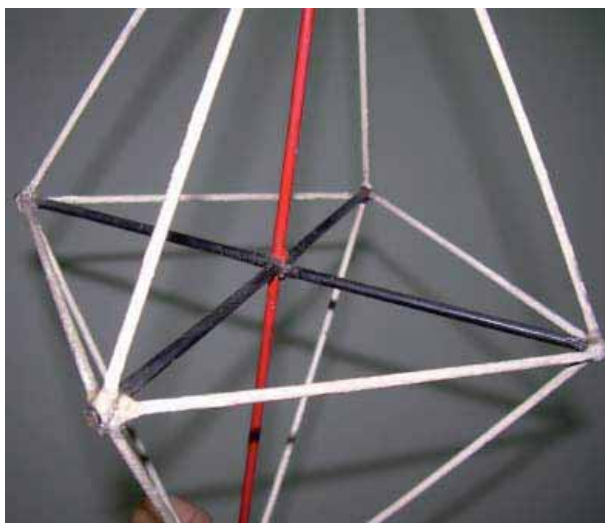
Sistema Cúbico ó Isométrico: Tres ejes mutuamente perpendiculares, de longitudes iguales (por esto, se usa el mismo color) y se llaman a_1 , a_2 y a_3 .

Sistema Tetragonal: Tres ejes mutuamente perpendiculares, dos de ellos, los horizontales, son de igual longitud (de igual color) y se llaman a_1 y a_2 . El eje vertical es más corto ó más largo que los otros dos.

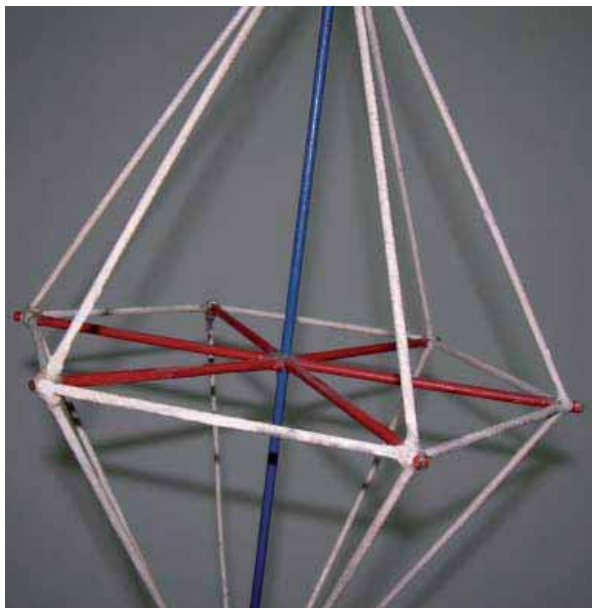
FIGURA 42. Características de los Ejes cristalográficos para cada uno de los Sistemas cristalinos.



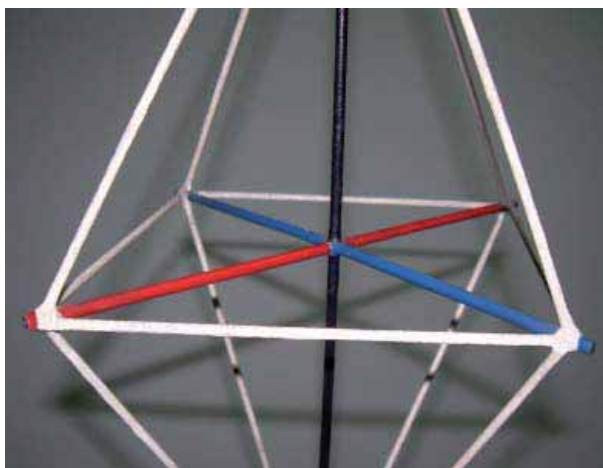
Sistema Cúbico o Isométrico



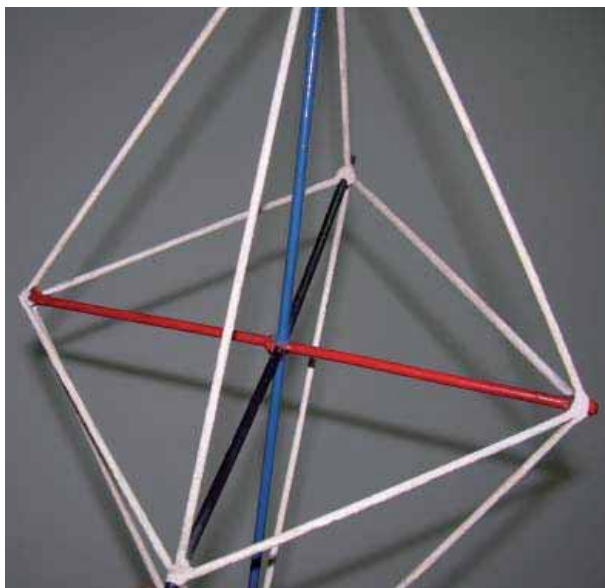
Sistema Tetragonal



Sistema Hexagonal



Sistema Rómbico



Sistema Monoclínico



Sistema Triclínico

Sistema Rómbico: Tres ejes mutuamente perpendiculares y todos son de diferente longitud (de diferentes colores).

Sistema Hexagonal: Se usan cuatro ejes, tres de ellos en el plano horizontal y uno es vertical. Los ejes horizontales son a_1 , a_2 y a_3 , y se sitúan a 120° uno del otro. El cuarto eje es vertical, es el eje C y puede ser de mayor ó menor longitud que los horizontales. Los tres ejes a_1 , a_2 y a_3 son coplanares, de igual longitud (igual color) y perpendiculares a C.

Sistema Monoclínico: Tres ejes desiguales (de diferente color), dos de ellos forman un ángulo oblicuo, siendo el tercero perpendicular al Plano de los otros dos.

Sistema Triclínico: Tres ejes desiguales (de diferente color), que se cortan en ángulos oblicuos.

5.14.1. Relaciones axiales

En todos los sistemas cristalinos, con excepción del Cúbico, existen Ejes cristalográficos con longitud diferente.

Si se pudiera aislar la Celda unidad y medir las dimensiones de las aristas, estaríamos en la posibilidad de hallar las relaciones existentes entre las longitudes de cada arista.

Con los rayos x se pueden medir con exactitud las dimensiones de la celda en unidades Angstrom (\AA).

Se sabe por ejemplo que las dimensiones de la celda del azufre (S) son: $a = 10,47 \text{\AA}$, $b = 12,87 \text{\AA}$, $c = 24,49 \text{\AA}$.

Haciendo el valor de b igual a la unidad, se puede conocer el tamaño de a y b relativo; resulta entonces la relación siguiente:

a: b: c = 0,8315: 1: 1,903.

Mucho antes de la aplicación de los rayos x para determinar las dimensiones absolutas de la Celda unidad, se conocía esta relación entre la morfología cristalina y la estructura interna, y se calcularon relaciones axiales.

Midiendo los ángulos interfaciales en el cristal y haciendo ciertos cálculos, es posible conocer relaciones axiales que expresen las longitudes relativas de los Ejes cristalográficos.

Es bastante sorprendente la poca diferencia que existe entre las relaciones axiales calculadas a partir de las dimensiones de la celda unidad (actuales) y las relaciones deducidas por mediciones morfológicas (antiguas). Para el azufre, en 1869 se reportaron:

$$a: b: c = 0,8131:1: 1,9034.$$

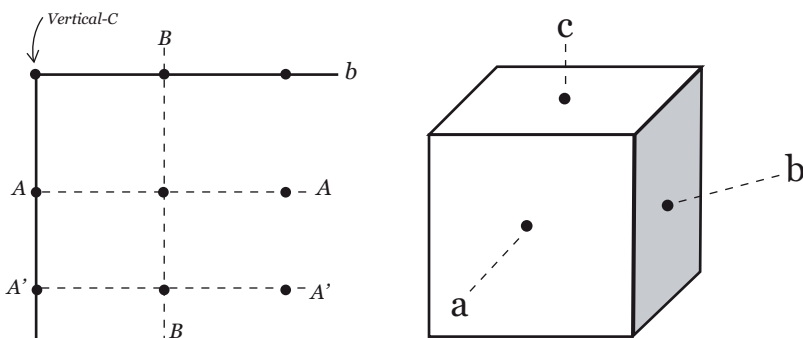
5.14.2. Intersecciones de las caras

Las caras del cristal se definen en posición por su intersección con los Ejes cristalográficos.

Una cara puede cortar a un eje a una cierta medida, ó ser paralela a él.

Es importante determinar a qué distancia relativa corta la cara a los diferentes ejes (fig. 43).

FIGURA 43. Corte ó paralelismo de una cara con los tres Ejes Cristalográficos.



El plano AA es paralelo a los ejes b y c y corta al eje a a una cierta medida, por tanto, las intersecciones para este plano son: $1a, \infty b, \infty c$.

El plano A'A' (es paralelo a AA), corta al eje a a una distancia doble de medida. Sus intersecciones son: $2a, \infty b, \infty c$

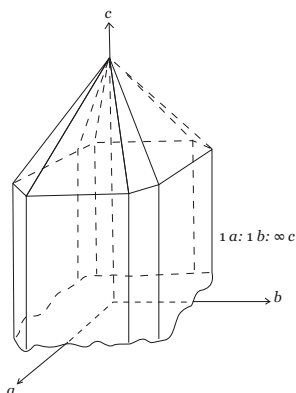
El plano BB es paralelo a los ejes a y c y corta a b a una cierta medida. Sus intersecciones son: $\infty a, 1b, \infty c$.

El plano AB corta a los ejes A y B a distancias iguales y es paralelo a c. Sus intersecciones son: $1a, 1b, \infty c$.

Un plano que corte a los tres ejes a igual medida, tendría de parámetros $1a: 1b: 1c$.

La figura 44, muestra el desarrollo de las caras cristalinas que son paralelas a los planos indicados en la figura 43. Las intersecciones indicadas en las caras son valores estrictamente relativos y no indican longitudes reales de corte.

FIGURA 44. Caras de un cristal y sus cortes con los ejes a, b y c.
(Klein y Hurlbut, 1988: 45).

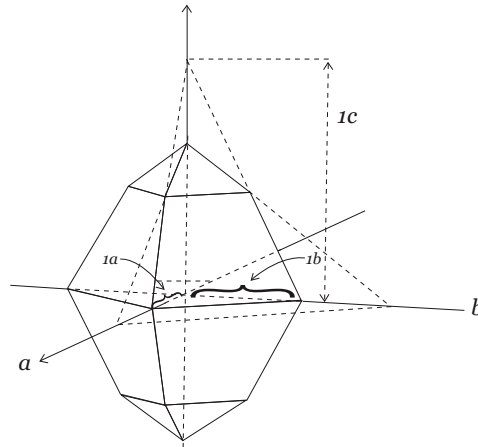


Cuando las intersecciones se asignan a las caras de un cristal sin conocimiento de las dimensiones de la Celda unitaria, una cara que corte a los tres ejes recibe la asignación: $1a, 1b, 1c$, y se llama Cara unidad del cristal.

Cuando en el cristal hay varias caras que corten a los tres ejes, se elige la más grande y aquella que se desarrolle con mayor frecuencia.

La figura 45, muestra un cristal Rómbico, donde la cara sombreada corta a los tres Ejes cristalográficos en sus extremos positivos, con intersecciones $1a$, $1b$, $1c$.

FIGURA 45. Intersecciones de caras con los tres Ejes cristalográficos, en un cristal Ortorómbico. (Klein y Hurlbut, 1988: 45).



La cara que está encima de la anterior se puede prolongar hacia los ejes y buscar su intersección con ellos, llegando a ser: $2a$: $2b$: $2/3 c$, respecto a la cara unidad.

Dividiendo por dos, como factor común, llegamos a $1 a$, $1b$, $1/3c$.

Debe entenderse que los parámetros de una cara no tienen relación con su tamaño, pues una cara puede moverse paralelamente a sí misma, a cualquier distancia, sin que cambien los valores relativos de sus intersecciones con los ejes cristalográficos.

5.14.3. Índices de Miller

Los índices de Miller de una cara consisten en una expresión de números enteros que se deducen de los parámetros obtenidos por intersección y su posterior inversión. Si es preciso, se eliminan los fraccionarios.

Los números que expresan los índices se refieren en su orden a los ejes a, b y c (son cuatro en el sistema Hexagonal). Las letras que indican los diferentes ejes se omiten, y para simplificar aún más los signos de relación, también se omiten.

Volviendo a la fig. 45, las intersecciones de las dos caras planteadas son: 1a, 1b, 1c y 2 a, 2b, 2/3c respectivamente.

Al invertir los parámetros queda: $1/1 \ 1/1 \ 1/1$ y $1/2 \ 1/2 \ 3/2$ respectivamente.

Con el objeto de eliminar fraccionarios en la segunda expresión, multiplicamos por dos, quedando entonces los índices de Miller de (111) para la cara unidad, y (113) para la otra cara.

Generalmente los números que expresan los índices de Miller son enteros pequeños. Cuando estos números son de dos dígitos, se utiliza la coma para separarlos, por ejemplo: (1 , 12, 4), y se lee: “uno, doce, cuatro”.

Si la cara corta a alguno de los ejes cristalográficos en forma negativa, se coloca una raya encima del número que corresponde a dicho corte, por ejemplo: $(1 \bar{1} 1)$, y se lee: “uno, menos uno, uno”.

Nótese que los índices que estamos expresando corresponden a caras del cristal, y por eso se colocan entre paréntesis. Si vamos a dar los índices de una Forma cristalina, la expresión contiene el símbolo de llaves: $\{1 \bar{1} 1\}$

Cuando no se conocen las intersecciones exactas, se usa el símbolo general (hkl), sabiendo que en su orden representan los recíprocos de sus intersecciones a lo largo de los ejes a, b y c.

La expresión (hkl) indica que una cara corta desigualmente a los tres ejes.

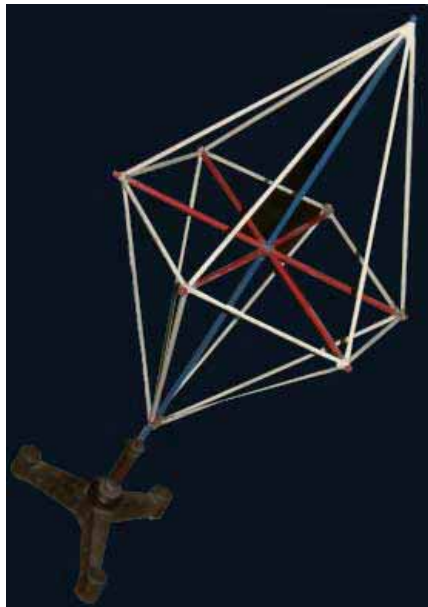
Si una cara es paralela a uno de los ejes y corta a los otros dos, el símbolo general se escribe $(0kl)$, $(h0l)$ ó $(hk0)$, según sea el caso particular.

Si la cara es paralela a dos ejes y corta sólo a uno, esa medida se considera una distancia unidad, y los índices serían: (100) , (010) , (001) , con sus equivalentes negativos: $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$ y $(00\bar{1})$.

Para el sistema Hexagonal el símbolo general es $(hk\bar{l})$, en donde las tres primeras letras se refieren a los ejes a_1 , a_2 y a_3 , y la última, al eje C.

Recordemos cuál es la localización de los ejes en el sistema Hexagonal (fig. 46), (tanto en la división Hexagonal, como en la Romboédrica): tres ejes idénticos, llamados a_1 , a_2 y a_3 , coplanares y perpendiculares al eje C, que es vertical. Si los miramos en planta, sería así:

FIGURA 46. Ejes cristalográficos para el sistema Hexagonal.



Como se puede observar, el eje a_3 , en su extremo negativo, se encuentra entre los ejes a_1 y a_2 , de extremos positivos. Por esta razón, el índice que le corresponde al tercer eje, será siempre negativo (\bar{i}).

También, en esta notación, $h + k + i = 0$ se cumple invariablemente, por ejemplo:

En los índices:

$$10\bar{1}0, 1 + 0 + \bar{1} = 0$$

$$11\bar{2}0, 1 + 1 + \bar{2} = 0$$

$$11\bar{2}1, 1 + 1 + \bar{2} = 0$$

5.15. FORMA CRISTALINA

El uso del término “Forma” nos hace pensar en el aspecto externo del cristal, lo que queda expresado con la palabra “hábito”.

Cuando nos referimos a la Forma Cristalina, pensamos en un conjunto de caras iguales (ó aproximadamente iguales, debido a la frecuente deformación de los cristales), relacionadas por elementos de simetría.

En general estas caras, conservan las mismas propiedades físicas y químicas, pues todas ellas son el reflejo de igual orden atómico interno.

Externamente, las caras que componen una forma, pueden tener diferentes tamaños, debido a la imperfecta formación del cristal.

Para reconocerlas, normalmente nos ayudamos por la observación de estrías naturales, figuras de corrosión ó crecimientos. A veces es necesario someter el cristal a un ataque químico, que revele estas evidencias.

Aplicando el concepto dado anteriormente, veamos cuántas formas encontramos en un cristal Cúbico:

Así cristalizan con frecuencia, la Halita, Pirita y Galena (fig. 47).

FIGURA 47. Análisis del concepto de Forma Cristalina en un Cubo.



Halita.
Procedencia: Zipaquirá,
Cundinamarca.



Pirita.
Procedencia: Muzo, Boyacá.



Galena. Procedencia: Santander de
Quilichao, Cauca.

Cada una de las seis caras que componen el cristal tiene relación con las otras, mediante los elementos de simetría existentes, es decir, por medio de los ejes (Cuaternarios, Ternarios, Binarios), por los planos de simetría ó por el Centro de simetría.

Cada una de las caras es además, en su forma y aspecto, igual a las demás. Llegamos entonces a la conclusión de que en este cristal, sólo hay una Forma cristalina.

Para representarla con la notación de Miller, debemos seguir algunas convenciones ya establecidas. Estas son: en lo posible, elegir una expresión positiva, es decir, un símbolo en donde todas las partes sean positivas; además, el símbolo debe presentar sus partes de forma creciente (ascendente en magnitud).

Expresando las seis caras del Cubo con sus índices de Miller, tenemos:

Cara 1: (100)	cara 4: ($\bar{1}$ 00)
Cara 2: (010)	cara 5: (0 $\bar{1}$ 0)
Cara 3: (001)	cara 6: (00 $\bar{1}$)

Vemos como toda expresión positiva tiene su equivalente negativo. Por esto, podemos concluir la existencia del Centro de simetría.

Siguiendo las convenciones antes explicadas, se elige la expresión (001) para representar la forma de este cristal.

Note como las expresiones negativas quedan todas descartadas.

Se llama Forma general, a aquella que tiene por índices (hkl), es decir que corta diferentemente a los tres ejes cristalográficos.

En un cristal puede haber un número variable de Formas, desde una sola (como en el caso del Cubo), hasta combinaciones de cuatro, cinco y aún más.

Una Forma compuesta sólo por dos caras que sean paralelas, tiene que estar acompañada de otra u otras formas en el cristal, porque por sí sola, no puede llenar el espacio tridimensional; éstas son las llamadas formas abiertas.

En las figuras 48 y 49 vemos algunos ejemplos de Formas abiertas. Al extender las caras y mirar los interceptos de unas con otras, vemos que no pueden cerrar ó llenar el espacio.

Una Forma será cerrada, si las prolongaciones de sus caras limitan enteramente el cristal.

El Cubo es por ejemplo una Forma cerrada, pues sus seis caras se encuentran y se cortan unas con otras.

Las figuras 50, 51 y 52, muestran algunos ejemplos de formas cerradas. Nótese como pueden existir solas ó en combinación con otras cerradas ó abiertas.

5.15.1. Nombres de las Formas

5.15.1.1. Pinacoide

Forma abierta constituída por dos caras paralelas (fig.48).

FIGURA 48. Forma Cristalina: Pinacoide.
Corindón (Rubí). Procedencia: Madagascar.



5.15.1.2. Prisma

Forma abierta que puede estar compuesta por tres, cuatro, seis, ocho ó doce caras, todas ellas paralelas al mismo eje. El número de caras depende del sistema al cual pertenece el cristal.

FIGURA 49. Forma Cristalina: Prisma.
Turmalina, var. Chorlo. Procedencia: Neudeck, Bohemia.



5.15.1.3. Bipirámide

Forma cerrada de seis, ocho, doce, dieciséis ó veinticuatro caras, según sea el sistema.

Pueden considerarse como formadas por dos Pirámides, unidas por reflexión, la una sobre la otra a través de un Plano de simetría horizontal.

FIGURA 50. Forma Cristalina: Bipirámide.



5.15.1.4. Trapezoedro trigonal

Forma cerrada compuesta por seis caras, las tres superiores giradas con respecto a las tres inferiores.

Esta Forma es el resultado de un eje Ternario, combinado con ejes Binarios perpendiculares.

FIGURA 51. Forma Cristalina: Trapezoedro trigonal.



5.15.1.5. Escalenoedro Hexagonal.

Forma cerrada compuesta de doce caras, tres pares de caras arriba y tres pares abajo, en posición alterna, relacionadas entre sí por una rotoinversión Ternaria. La forma geométrica de cada una es un triángulo escaleno.

FIGURA 52. Forma Cristalina: Escalenoedro.



5.15.1.6. Romboedro

Seis caras que constituyen una Forma cerrada, tres de ellas en la parte superior alternan con las otras tres en la parte inferior, giradas entre sí, 60° .

FIGURA 53. Forma Cristalina: Romboedro.
Calcita, var. Espato de Islandia. Procedencia: New México, U.S.A.



5.15.1.7. Cubo ó Hexaedro

Forma cerrada compuesta por seis caras que se cortan a 90° una de otra.

FIGURA 54. Forma Cristalina: Cubo ó Hexaedro.
Halita. Procedencia: Zipaquirá, Cundinamarca.



5.15.1.8. Octaedro

Forma cerrada compuesta por ocho caras, cada una con aspecto geométrico de un triángulo equilátero.

FIGURA 55. Forma Cristalina: Octaedro.
Magnetita.



5.15.1.9. Dodecaedro Rómbico

Forma cerrada compuesta por doce caras, cada una con aspecto de rombo.

FIGURA 56. Forma Cristalina: Dodecaedro Rómbico.
Granate.



5.15.1.10. Trapezoedro

Forma cerrada compuesta por veinticuatro caras, cada una de aspecto geométrico trapezoidal.

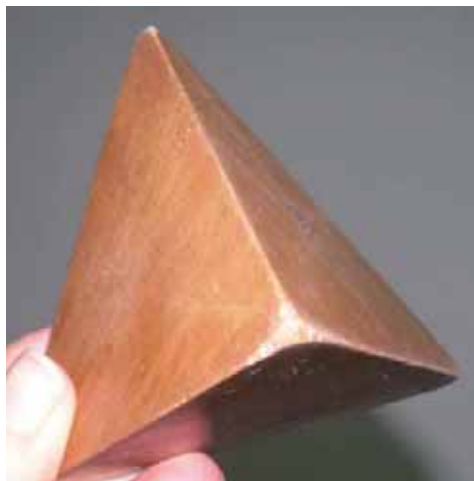
FIGURA 57. Forma Cristalina: Trapezoedro.
Granate. Procedencia: Cucutilla, Norte de Santander.



5.15.1.11. Tetraedro

Forma cerrada compuesta por cuatro caras, cada una con forma geométrica de un triángulo equilátero.

FIGURA 58. Forma Cristalina: Tetraedro.



5.15.1.12. Piritoedro

Forma cerrada compuesta por doce caras, cada una de aspecto pentagonal.

FIGURA 59. Forma Cristalina: Piritoedro.
Pirita. Procedencia: Muzo, Boyacá.



Se acaban de enunciar los nombres de las formas que con mayor frecuencia ocurren en los minerales más corrientes.

Existen otras Formas como son: Pedión, Domo, Esfenoide, Tetraquishexaedro, Triaquisoctaedro, Dodecaedro Deltoidal, Diploedro, Hexaquisoctaedro, etc, que pueden ser consultadas en los tratados clásicos de Cristalografía.

5.16. LAS 32 CLASES CRISTALINAS

Como ya se había tratado, sólo son posibles 32 formas de combinar los diferentes elementos de simetría para que puedan ser compatibles.

Estas combinaciones, dan lugar a las 32 Clases Cristalinias ó Clases Cristalográficas.

Recordemos que la expresión (hkl) representa los índices de Miller de la Forma general, que corta de manera diferente a los tres Ejes cristalográficos.

El nombre que recibe la Forma general, es el nombre que se dará a la Clase, por ejemplo: (hkl) en la simetría: $2/m \ 2/m \ 2/m$ es la Forma llamada Bipirámide rómbica. El nombre de la Clase será entonces Bipiramidal rómbica.

En la simetría $4/m \ \bar{3} \ 2/m$, (hkl) es la Forma general llamada Hexaquisoctaedro, por tanto, el nombre de la Clase será Hexaquisoctaédrica.

La cantidad de especies minerales que cristalizan en cada uno de los seis sistemas cristalinos es muy variable. Se ha encontrado la siguiente distribución.

En el sistema Cúbico ó Isométrico	26%
En el sistema Hexagonal	19%
En el sistema Tetragonal	12%
En el sistema Ortorrómbico	20%
En el sistema Monoclínico	21%
En el sistema Triclínico	2%

Se ha encontrado también que la mayor cantidad de especies minerales se encuentra en la Clase cristalina de más alta simetría de cada sistema.

Estas clases son: $\bar{1}$ en el Triclínico, $2/m$ en el Monoclínico; $2/m \ 2/m$ en el Rómbico; $4/m \ 2/m \ 2/m$ en el Tetragonal; $\bar{3} \ 2/m$ en el Hexagonal, división Romboédrica; $6/m \ 2/m \ 2/m$ en el Hexagonal, división Hexagonal y $4/m \ \bar{3} \ 2/m$ en el Cúbico.

Se agrega a esta lista, las clases $3 \ 2$ de la división Romboédrica del sistema Hexagonal; $\bar{4} \ 3 \ 2$ y $2/m \ \bar{3}$ del sistema Cúbico, por

representar especies minerales de marcada importancia, como son, Cuarzo, Esfalerita y Pirita.

En total son entonces 10 Clases, de las 32 que existen, las que se van a considerar, como más importantes en este estudio.

La tabla 3, muestra la distribución convencional de los sistemas y clases cristalinas.

TABLA 3. Las 32 Clases de Cristales y su simetría característica.
(Cornelius Klein y Cornelius Hurlbut Jr., Manual de Mineralogía. 1998. 72p).

Clase del cristal	Sistema	Simetría Característica	Notación de Herman - Mauguin
1. $\bar{1}$	Triclínico	Sólo simetría monaria	Por su baja simetría no hay restricciones cristalográficas.
2.m. 2/m	Monoclínico	Sólo un eje de rotación binaria y/o un plano de simetría	El eje binario se toma como eje <i>b</i> y el plano de simetría (plano <i>a - c</i>) es vertical.
222. mm2 2/m 2/m 2/m	Ortorrómico	Tres direcciones mutuamente perpendiculares alrededor de los cuales hay simetría binaria (2 ó m)	Los símbolos se refieren a los elementos de una simetría de orden <i>a, b, c</i> ; los ejes binarios coinciden con los ejes cristalográficos.
4. $\bar{4}$. 4/m 422. 4mm. $\bar{4}2m$. 4/m 2/m 2/m	Tetragonal	Un eje cuaternario	Los ejes cuaternarios se refieren al eje <i>c</i> ; el segundo símbolo (si lo hay) se refiere a las direcciones axiales (<i>a₁</i> y <i>a₂</i>); el tercer símbolo (si lo hay) a las direcciones 45° con respecto a <i>a₁</i> y <i>a₂</i> .
6. $\bar{6}$. 6/m 622. 6mm $\bar{6}2m$. 6/m 2/m 2/m 3. $\bar{3}$. 32 3m. $\bar{3}2/m$	Hexagonal	Un eje senario	El primer número se refiere al eje <i>c</i> ; el segundo y tercer símbolos (si los hay) se refieren respectivamente a los elementos de simetría paralelos y perpendiculares a los ejes cristalográficos <i>a₁</i> , <i>a₂</i> y <i>a₃</i> .
23. 2/m $\bar{3}$ 432. 43m 4/m $\bar{3}$ 2/m	Isométrico	Cuatro ejes ternarios inclinados respecto a los ejes cristalográficos	El primer número se refiere a los tres ejes cristalográficos <i>a₁</i> , <i>a₂</i> y <i>a₃</i> ; el segundo número se refiere a las cuatro direcciones diagonales de simetría ternaria (entre los vértices de un cubo); el tercer número o símbolo (si lo hay) se refiere a seis direcciones entre las aristas de un cubo

5.16.1. Formas en el Sistema Triclínico.

Ejes cristalográficos

Los tres ejes cristalográficos, son de diferente longitud y forman ángulos oblicuos entre sí.

Para orientar un cristal triclínico, lo primero que hay que hacer es definir “la zona” del cristal (máximo conjunto de caras y/o aristas paralelas entre sí), y paralelamente a ella se elige el eje c, vertical.

Enseguida se buscan los ejes a y b, haciéndolos paralelos a aristas del cristal y que sigan la tendencia general de orientación: a, va de atrás hacia delante del observador, inclinado hacia los pies de éste y b, va de izquierda a derecha del observador. El eje b debe ser más largo que el eje a.

1: Clase Pinacoidal: $\bar{1} = C$.

La simetría consiste en un Eje de inversión Monario, que equivale al Centro de simetría.

FIGURA 60. Formas en cristales Triclínicos.
Calcantita. Artificial.



Todas las Formas de esta Clase son Pinacoides y se componen de dos caras semejantes y paralelas.

1. (100) Pinacoide frontal. Corta al eje a y es paralelo a los otros dos.
2. (010) Pinacoide lateral. Corta al eje b y es paralelo a los otros dos.
3. (001) Pinacoide basal. Corta al eje c y es paralelo a los otros dos.
4. (0kl) Pinacoide de primer orden. Paralelo al eje a y corta a b y a c en longitudes diferentes. Puede existir la forma negativa, $(0\bar{k}l)$.
5. (h0l) Pinacoide de segundo orden. Paralelo al eje b. Corta a a y c en medidas diferentes. Puede existir la forma negativa $(\bar{h}0l)$.
6. (hk0) Pinacoide de tercer orden. Es paralelo al tercer eje (eje c) y corta a a y b en longitudes diferentes. Puede existir la forma negativa $(\bar{h}k0)$.
7. (hkl) Pinacoide de cuarto orden. Corta a los tres ejes a medidas diferentes. Pueden existir las formas negativas: $(\bar{h}kl)$, $(h\bar{k}l)$ ó $(hk\bar{l})$.

Minerales de importancia que cristalizan en esta clase son: Calcantita, Microclina, feldspatos plagioclasas, Rodonita, Turquesa y Wollastonita.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

Modelo No. 146.

Pinacoide frontal {100}

Pinacoide lateral {010}

Pinacoide basal {001}.

Modelo No. 149.

Pinacoide frontal {100}

Pinacoide lateral {010}

Pinacoide basal {001}

Pinacoide de primer orden {0kl}

Pinacoide de tercer orden {hkl}

Pinacoide de cuarto orden {hkl}

5.16.2. Formas en el Sistema Monoclínico

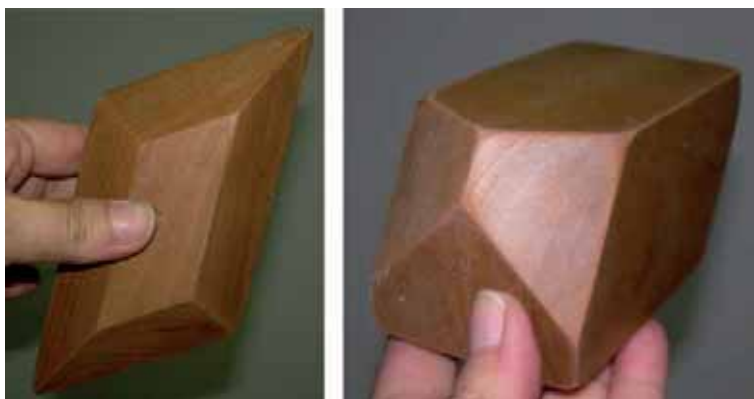
Ejes cristalográficos

Los tres Ejes cristalográficos son de diferente longitud.

En cuanto a las relaciones angulares, $\alpha = \gamma = 90^\circ$. En la mayoría de los cristales, el ángulo que forman $a(+)$ y $c(+)$ es mayor de 90° , pero a veces puede ser de 90° como en la Estauroлита, razón por la cual el cristal no parece Monoclínico, sino Rómbico (pseudo-Ortorrómbico).

El primer eje que se elige es b y debe coincidir con el Eje de simetría Binaria. El eje a , va inclinado hacia los pies del observador y c , es vertical, paralelo a la “zona” del cristal.

FIGURA 61. Formas en cristales Monoclínicos.



Es muy probable que pueda haber dos ó más orientaciones igualmente buenas, pero se prefiere, por convención, c menor que a .

El hábito cristalino ayuda a la orientación del cristal. Si los cristales son de hábito prismático, ó sea de desarrollo alargado, esa dirección se usa a menudo como eje c.

La exfoliación es también un factor importante para orientar un cristal monoclinico. Ella se toma usualmente como exfoliación básica, por ejemplo en la Ortoclasa. Si hay dos exfoliaciones, como pasa en anfíboles y piroxenos, se les considera como exfoliaciones verticales prismáticas.

2/m: Clase Prismática: A_2 , p, c.

Para escoger el primer eje (b), hacemos uso de la información que nos ofrece la notación Hermann-Mauguin, pues bien nos dice que el único eje Binario es perpendicular al Plano de simetría.

Visualizar un plano en un cristal es mucho más rápido y sencillo que un eje, por esto, hallamos el plano, y perpendicularmente a él encontramos el eje, que será b, orientado de izquierda a derecha del observador.

Enseguida definimos cuál es la “zona” del cristal, y paralelamente a ella, se elige c (vertical). El tercer eje es a, inclinado hacia los pies del observador y lo hacemos paralelo a una arista real del cristal.

Sólo existen en esta clase cristalina, Pinacoides y Prismas.

1. (100) Pinacoide frontal. Corta al eje a y es paralelo a b y a c.
2. (010) Pinacoide lateral. Corta al eje b y es paralelo a a y a c.
3. (001) Pinacoide basal. Corta al eje c y es paralelo a a y a b.
4. (h0l) Pinacoide de segundo orden. Corta a a y a c a medidas diferentes y es paralelo al eje b. También puede existir la forma negativa. (h0l).
5. (0kl) Prisma de primer orden. Corta a los ejes b y c a medidas diferentes y es paralelo al eje a.

6. (hk0) Prisma de tercer orden. Corta a los ejes a y b a distancias diferentes y es paralelo al eje c.
7. (hkl) Prisma de cuarto orden. Corta diferentemente a los tres Ejes cristalográficos. Estos Prismas se componen de cuatro caras.

Algunos de los minerales más corrientes e importantes de esta clase son: Azurita, Caolinita, grupo anfíbol (clino), grupo piroxeno (clino), Clorita, Epidota, Heulandita, Malaquita, grupo mica, Oropimente, Ortosa, Rejalgar, Talco, Esfena y Yeso.

Algunos ejemplos de la colección de estudio

Modelo No. 126

Pinacoide frontal {100}
Pinacoide lateral {010}
Pinacoide basal {001}

Modelo No. 130.

Pinacoide lateral {010}
Prisma de primer orden {0kl}
Prisma de tercer orden {hk0}

Modelo No. 136.

Pinacoide lateral {010}
Pinacoide basal {001}
Prisma de tercer orden {hk0}
Prisma de cuarto orden {hkl}

Modelo No. 140.

Pinacoide lateral {010}
Pinacoide basal {001}
Prisma de segundo orden {h0l}
Prisma de tercer orden {hk0}.

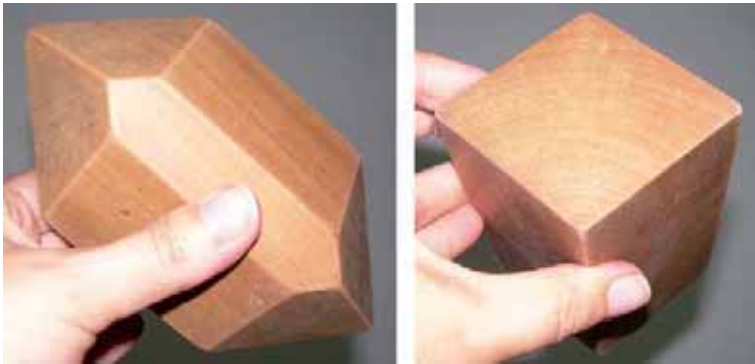
5.16.3. Formas en el Sistema Ortorrómbico (Rómbico).

Ejes cristalográficos

Los tres Ejes cristalográficos son de diferente longitud y todos son perpendiculares entre sí.

Para orientar un cristal Ortorrómbico, (fig. 62) se sigue una convención regida por el hábito del cristal.

FIGURA 62. Formas de cristales Ortorrómbicos.



Si el desarrollo es tabular, el eje c es el más corto, tal que, c menor que a , menor que b . Si el desarrollo es bipiramidal, c es el eje más largo, tal que c mayor que a , mayor que b .

$2/m\ 2/m\ 2/m$: Clase Bipiramidal Rómbica: $3A_2, 3\sigma, c$.

Los tres Ejes cristalográficos son de simetría Binaria y cada uno tiene un Plano de simetría perpendicular.

1. (100) Pinacoide frontal. Corta al eje a y es paralelo a b y a c .
2. (010) Pinacoide lateral. Corta al eje b y es paralelo a a y a c .
3. (001) Pinacoide basal. Corta al eje c y es paralelo a a y a b .
4. (0kl). Prisma de primer orden. Forma compuesta de cuatro caras que corta a los ejes b y c a distancias diferentes y es paralelo al eje a .

5. $(h0l)$ Prisma de segundo orden. Corta en diferentes medidas a a y c y es paralelo al eje b.
6. $(hk0)$ Prisma de tercer orden. Corta a los ejes a y b a distancias diferentes y es paralelo al eje c.
7. (hkl) Bipirámide rómbica. Consta de ocho caras triangulares, cortando a los tres ejes en medidas desiguales.

Algunos de los más comunes e importantes minerales de esta clase son: Andalucita, Antofilita, Aragonito, Azufre, Baritina, Cordierita, Enstatita, Estibina, Goethita, Marcasita, Olivino, Sillimanita, Topacio.

Algunos ejemplos de la colección de estudio

Modelo No. 107.

Bipirámide rómbica $\{hkl\}$

Modelo No. 110.

Pinacoide frontal $\{100\}$

Pinacoide lateral $\{010\}$

Pinacoide basal $\{001\}$

Modelo No. 113.

Prisma de segundo orden $\{h0l\}$

Prisma de segundo orden $\{h0l\}$

Prisma de tercer orden $\{hk0\}$.

Modelo No. 116.

Pinacoide basal $\{001\}$

Prisma de primer orden $\{0kl\}$

Prisma de segundo orden $\{h0l\}$

Prisma de tercer orden $\{hk0\}$

Modelo No. 122.

Prisma de primer orden $\{0kl\}$

Prisma de segundo orden $\{h0l\}$

Pisma de tercer orden {hk0}

Bipirámide rómbica {hkl}.

5.16.4. Formas en el Sistema Tetragonal

Ejes cristalográficos

Los tres Ejes cristalográficos son mutuamente perpendiculares, dos de ellos, los horizontales son iguales en longitud, y por tanto, intercambiables. El eje c es vertical, y es de diferente tamaño (puede ser más largo ó más corto que los horizontales).

4/m 2/m 2/m: Clase Bipiramidal Ditetragonal: A_4 , $4A_2$, 5p, c.

El eje c, vertical, es de simetría Cuaternaria. Existen cuatro ejes horizontales de simetría Binaria, dos de los cuales serán los ejes a y b.

La escogencia de los dos ejes Binarios horizontales se hace teniendo en cuenta que la forma dominante del cristal, es decir, la más desarrollada, sea de primer orden, así las otras que han crecido en menor tamaño, quedan de segundo orden.

FIGURA 63. Formas en cristales Tetragonales.



Pueden estar en el cristal combinaciones de Prismas, Bipirámides ó incluso, Prismas con Bipirámides.

1. (110). Prisma tetragonal de primer orden. Forma compuesta de cuatro caras que corta en iguales medidas a los ejes a y b y es paralela a c.
2. (100) Prisma tetragonal de segundo orden. Corta al eje a y es paralela a b y a c.
3. (hk0) Prisma ditetragonal. Ocho caras verticales rectangulares, cada una de ellas corta a los ejes a y b desigualmente. El prefijo di, duplica el número de caras.
4. (hhl) Bipirámide tetragonal de primer orden. Se compone de ocho caras triangulares isósceles, cada una de las cuales corta a igual medida a los ejes a y b, y en longitud diferente, corta a c.
5. (0kl) Bipirámide tetragonal de segundo orden. Ocho caras triangulares isósceles, cada una de las cuales corta en medidas desiguales a b y a c, y es paralela al eje a.
6. (hkl) Bipirámide ditetragonal. 16 caras de triángulos escalenos, cada una de las cuales corta los tres ejes diferentemente.
7. (001) Pinacoide basal. Dos caras paralelas, perpendiculares al eje Cuaternario, cortan a c, más no a a y a b.

Algunos minerales representantes de esta clase son: Rutilo, Casiterita, Circón.

Algunos Ejemplos de la colección de estudio

Modelo No. 88.

Bipirámide tetragonal de primer orden {hhl}

Modelo No. 91.

Prisma tetragonal de primer orden {110}

Pinacoide basal {001}

Modelo No. 95.

Prisma tetragonal de primer orden {110}

Prisma tetragonal de segundo orden {100}

Bipirámide tetragonal de primer orden {hhl.}
Bipirámide tetragonal de segundo orden {0kl}
Pinacoide basal {001}

Modelo No. 96.

Prisma tetragonal de segundo orden {100}
Prisma ditetragonal {hkl}
Bipirámide tetragonal de primer orden {hhl}

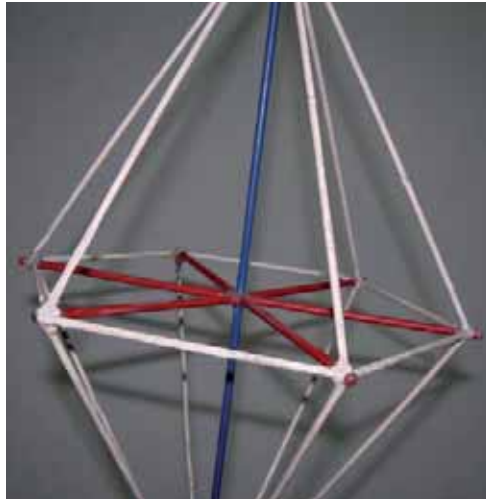
5.16.5. Formas en el Sistema Hexagonal-División Hexagonal.

Ejes cristalográficos:

Recordemos que en este sistema se requieren cuatro ejes. Tres de ellos ubicados en el plano horizontal, son: a_1 , a_2 y a_3 , de igual longitud y separados a 120° entre sus extremos positivos. El cuarto eje, c , es vertical.

La figura 64, muestra la orientación de dichos ejes.

FIGURA 64. Ejes cristalográficos Hexagonales.



6/m 2/m 2/m: Clase Bipiramidal DiHexagonal: A_6 , $6A_2$, $7p$, C.

El eje vertical es un eje de simetría Senario. Hay seis ejes horizontales de simetría Binaria, de los cuales sólo se necesitan tres para coincidir con a_1 , a_2 y a_3 .

La escogencia de los tres ejes Binarios horizontales se hace teniendo en cuenta que la Forma dominante del cristal, es decir, la más desarrollada, sea de primer orden, así, las otras que han crecido en menor tamaño, quedan de segundo orden.

Pueden estar en el cristal combinaciones de Prismas, Bipirámides, ó incluso, Prismas con Bipirámides.

FIGURA 65. Cristales Hexagonales, división Hexagonal.



Prisma y Bipirámide.



Pinacoide y Prisma.



Berilo

1. $(10\bar{1}0)$ Prisma Hexagonal de primer orden. Seis caras verticales, cada una de las cuales corta por igual a dos de los ejes cristalográficos horizontales, y es paralela al tercero.
2. $(11\bar{2}0)$ Prisma Hexagonal de segundo orden. Seis caras verticales, cada una de las cuales corta por igual a dos de los ejes horizontales, y al eje horizontal intermedio entre estos dos, a la mitad de dicha distancia.
3. $(hk\bar{i}0)$ Prisma DiHexagonal. Se compone de doce caras verticales, cada una de las cuales corta a los tres ejes horizontales a longitudes distintas.
4. $(h0\bar{h}l)$ Bipirámide Hexagonal de primer orden. Consta de 12 caras triangulares isósceles, cada una de las cuales corta por igual a dos de los ejes cristalográficos horizontales, es paralela al tercer eje y corta en distinta medida al eje vertical.
5. $(hh2\bar{h}l)$ Bipirámide Hexagonal de segundo orden. Se compone de doce caras triangulares isósceles, cada una de las cuales corta por igual a dos de los ejes horizontales, y al tercero ó intermedio, lo corta a la mitad de esa distancia, cortando también el eje vertical en distinta medida.
6. $(hk\bar{i}l)$ Bipirámide diHexagonal. 24 caras triangulares escalenas que cortan a distancias distintas a los tres ejes horizontales y también corta al eje c, pero a distinta medida.
7. (0001) Pinacoide basal. Dos caras paralelas a los ejes a_1 , a_2 y a_3 y sólo cortan a C.

Son ejemplos de minerales de esta clase: Berilo, Molibdenita, Pirrotina.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

Modelo No. 54.

Bipirámide Hexagonal de primer orden $\{10\bar{1}0\}$

Modelo No. 57.

Bipirámide diHexagonal $\{hk\bar{i}l\}$.

Modelo No. 60.

Prisma Hexagonal de primer orden $\{10\bar{1}0\}$

Bipirámide Hexagonal de primer orden $\{h0\bar{h}l\}$

Modelo No. 62.

Prisma Hexagonal de primer orden $\{10\bar{1}0\}$

Pinacoide basal $\{0001\}$

Bipirámide Hexagonal de primer orden $\{h0\bar{h}l\}$

Bipirámide Hexagonal de primer orden $\{h0\bar{h}l\}$

Bipirámide Hexagonal de segundo orden $\{hh\bar{2}hl\}$

Bipirámide diHexagonal $\{hk\bar{l}\}$.

5.16.6. Formas en el Sistema Hexagonal- División Romboédrica

Ejes cristalográficos:

Se requieren cuatro ejes, tres de ellos ubicados en el plano horizontal, son: a_1 , a_2 y a_3 , de igual longitud y separados a 120° entre sus extremos positivos. El cuarto eje, es C, vertical.

$\bar{3} 2/m$: Clase Escalenoédrica Hexagonal: $A_3, 3A_2, 3p, C$.

El eje vertical es el eje de simetría Ternario. Hay tres ejes horizontales de simetría Binaria, que son a_1 , a_2 y a_3 (fig. 66).

1. $(h0\bar{h}l)$ y $(0h\bar{h}l)$ Romboedro positivo y negativo. Se compone de seis caras rómbicas.
Se puede suponer como un cubo deformado en la dirección de uno de los ejes de inversión Ternario.
Según sea la deformación, el romboedro se llama agudo u obtuso, si hay alargamiento a lo largo del Eje de inversión, ó hay compresión a lo largo del mismo eje.
2. $(hk\bar{l})$ Escalenoedro. 12 caras de triángulos escalenos. Se diferencia de la Bipirámide por la apariencia en zigzag de las aristas medias.

FIGURA 66. Cristales Hexagonales, división Romboédrica.



El Romboedro y el Escalenoedro de esta clase se pueden combinar con otras formas como son, los Prismas Hexagonales, los Prismas Dihexagonales, la Bipirámide Hexagonal y el Pinacoide basal. Los índices correspondientes a estas formas son:

3. $(hh2\bar{h}l)$ Bipirámide Hexagonal de segundo orden.
4. $(10\bar{1}0)$ Prisma Hexagonal de primer orden.
5. $(11\bar{2}0)$ Prisma Hexagonal de segundo orden.
6. $(hki\bar{0})$ Prisma diHexagonal.
7. (0001) Pinacoide basal.

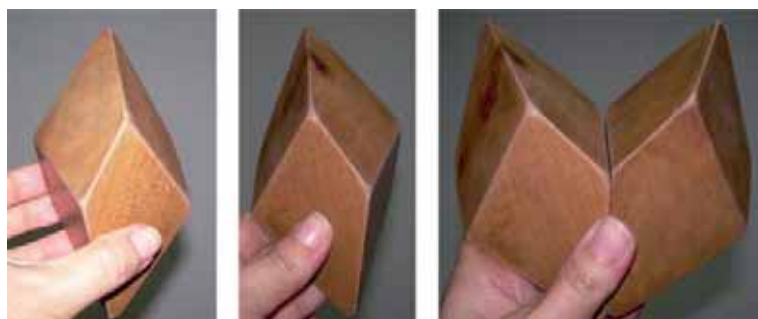
Estas combinaciones son frecuentes en cristales de Calcita, Chabacita y Corindón.

Algunos de los más importantes ejemplos de minerales que cristalizan en esta clase son: la Calcita y los minerales de su grupo: Magnesita, Siderita, Rodocrosita, Smithsonita. También el Corindón y la Hematita.

3 2: Clase Trapezoédrica Trigonal: $A_3, 3A_2$.

El eje Ternario es el eje C, vertical y los tres ejes Binarios son: a_1, a_2 y a_3 respectivamente.

FIGURA67. Trapezoedro Trigonal, izquierdo y derecho.



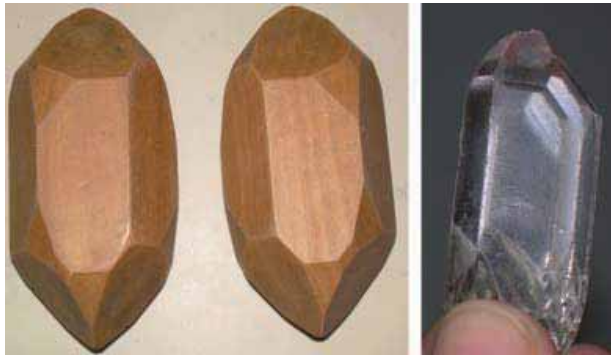
1. $(hk\bar{l})$ Trapezoedro Trigonal. Es la forma particular de esta clase. Se compone por seis caras de aspecto geométrico trapezoidal cada una. Existen los trapezoedros izquierdos y derechos, dando lugar a las formas enantiomorfas. El trapezoedro puede presentarse combinado con prismas trigonales, prisma Hexagonal, Prisma Ditrigonal, Romboedro y Pinacoide. Los índices correspondientes son:
2. $(h0\bar{h}l)$ y $(0h\bar{h}l)$ Romboedro positivo y negativo.
3. $(hh2\bar{h}l)$ Bipirámide Trigonal de segundo orden.
4. $(10\bar{1}0)$ Prisma Hexagonal de primer orden.
5. $(11\bar{2}0)$ Prisma Trigonal.
6. $(hk\bar{i}0)$ Prisma Ditrigonal.
7. (0001) Pinacoide basal.

El Cuarzo alfa ó de baja temperatura es el mineral más importante que cristaliza en esta clase. Aún así son pocas las veces en que pueden observarse las caras del Trapezoedro Trigonal (si aparecen son, además muy pequeñas, y mas bien parece un rectángulo algo deformado).

Cuando el Trapezoedro aparece, y según el lugar del cristal donde lo haga, se nombrarán los cristales derechos ó izquierdos. En la fig. 68, puede notarse la Forma del Trapezoedro.

También el Cinabrio, cristaliza en esta clase.

FIGURA 68. Cuarzo izquierdo y derecho.



Cuarzo izquierdo y derecho

Cuarzo var. Cristal de Roca.

Algunos ejemplos de la colección de estudio

Modelo No. 78.

Trapezodro trigonal izquierdo $\{hk\bar{l}\}$

Modelo No. 79.

Trapezoedro trigonal derecho $\{hk\bar{l}\}$.

Modelo No. 81.

Prisma ditrigonal $\{hk\bar{i}0\}$

Pinacoide basal $\{0001\}$

Modelo No. 84.

Romboedro positivo $\{h0\bar{h}l\}$

Romboedro negativo $\{0h\bar{h}l\}$

Prisma Hexagonal de primer orden $\{10\bar{1}0\}$

Bipirámide trigonal de segundo orden $\{hh2\bar{h}l\}$

Trapezoedro trigonal izquierdo $\{hk\bar{l}l\}$.

5.16.7. Formas en el Sistema Cúbico ó Isométrico

Ejes cristalográficos:

En este sistema existen tres ejes de igual longitud y mutuamente perpendiculares.

El eje a_1 es horizontal y va de atrás hacia delante del observador (positivo hacia él). El eje a_2 es también horizontal y se orienta de izquierda a derecha del observador (éste es su extremo positivo). El eje a_3 es vertical y va de abajo hacia arriba (positivo).

$4/m \bar{3} 2/m$: Clase Hexaquisoctaédrica: $3A_4$, $4A_3$, $6A_2$, $9p$, c .

Los tres Ejes cristalográficos son de simetría Cuaternaria y se orientan como ya fue expresado anteriormente.

FIGURA 69. Formas del sistema Cúbico, Clase Hexaquisoctaédrica.



1. (001) Cubo ó hexaedro. Seis caras cuadradas que forman ángulos de 90° entre si. Cada una de las caras corta a uno de los Ejes cristalográficos y es paralela a los otros dos.
2. (111) Octaedro. Ocho caras triangulares equiláteras, cada una de ellas corta en igual medida a los tres Ejes cristalográficos.
3. (011) Dodecaedro Rómbico. Doce caras, cada una con aspecto de rombo. Cada cara corta a dos de los Ejes cristalográficos a igual distancia y es paralela al tercero.
4. (hhl) Trapezoedro. 24 caras de forma trapezoidal, cada una de las cuales corta a un eje a una cierta medida y a los otros dos a distancias iguales entre si, pero diferentes a la primera.
5. (hll) Triaquisoctaedro. 24 caras de triángulos isósceles, cada una de ellas corta a dos de los ejes a una cierta distancia y al tercero, a otra medida.
6. (0kl) Tetraquishexaedro. 24 caras de triángulos isósceles, cada una de las cuales corta a dos de los ejes a medidas diferentes y es paralela al tercero.
7. (hkl) Hexaquisoctaedro. Es la forma general de la clase. Se compone de 48 caras de triángulos escalenos, cada una de las cuales corta a los tres ejes cristalográficos a distancias diferentes.

El Cubo, Octaedro y Dodecaedro Rómbico son las formas isométricas más corrientes en los cristales. El Trapezoedro se observa con frecuencia como única forma en muy pocos minerales, como por ejemplo, los granates. Las otras formas son muy raras y sólo aparecen como pequeñas truncaduras en las combinaciones de otras formas.

Minerales corrientes e importantes que cristalizan en esta clase son: Oro, Plata, Silvina, Uraninita, Fluorita, Galena, Granate, Halita, Analcima, Cobre, Diamante.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

Modelo No. 1.

Octaedro {111}.

Modelo No. 3.

Dodecaedro Rómbico {011}

Modelo No. 10.

Octaedro {111}

Cubo {001}.

Modelo No. 13.

Cubo {001}

Dodecaedro Rómbico {011}

Octaedro {111}.

Modelo No. 20.

Cubo {001}

Trapezoedro {hhl}.

Modelo No. 24.

Dodecaedro Rómbico {011}

Trapezoedro {hhl}.

3. $\bar{4} 3 m$: Clase Hexaquistetraédrica: $3A_4$, $4A_3$, $6P$.

Los tres Ejes cristalográficos son los tres ejes Cuaternarios de inversión ó los mismos tres ejes Binarios sencillos. Son también mutuamente perpendiculares y se orientan igual que en el caso anterior.

1.(111) y ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) Tetraedro positivo y negativo. Es una forma cerrada compuesta por cuatro caras triangulares equiláteras, cada una de las cuales corta a todos los Ejes cristalográficos a iguales distancias. En un mismo cristal pueden existir las dos formas, y normalmente se orienta ésta de manera que el Tetraedro más desarrollado quede positivo.

FIGURA 70. Formas del sistema Cúbico, Clase Hexaquistetraédrica.



Si ambos Tetraedros tienen igual desarrollo, cosa que no es frecuente, el cristal resultante, no podría distinguirse de un Octaedro, a menos que, como frecuentemente ocurre, las caras de las dos formas presenten diferente brillo, corrosiones ó estriaciones distintas, que sirven para diferenciarlas.

2. (hhl) y $(h\bar{h}l)$ Triaquistetraedro. Forma compuesta de doce caras, donde cada una de ellas corta a dos de los ejes a distancia igual y corta diferente al tercer eje.
3. (hll) y $(h\bar{l}l)$. Dodecaedro deltoidal. Se compone de 12 caras, donde cada una de ellas corta a los ejes b y c a igual medida, y a diferente distancia, el eje a .
4. (hkl) Hexaquistetraedro. Forma general de la clase, compuesta por 24 caras, que corta cada una diferentemente a los tres ejes cristalográficos.

También pueden estar presentes en esta clase, las formas del Cubo ó Hexaedro, el Dodecaedro Rómbico y el Tetraquishexaedro.

5. (001) Cubo ó hexaedro. Seis caras.
6. (011) Dodecaedro Rómbico. 12 caras.
7. $(0kl)$ Tetraquishexaedro. 24 caras.

Los miembros de la serie de las sulfosales Tetraedrita-Tennantita son los únicos minerales comunes que frecuentemente muestran formas de esta clase.

Son notables como piezas de colección, los cristales tetraédricos de la Tetraedrita. La Esfalerita algunas veces puede dar estas formas, aunque en buen desarrollo no son corrientes, pues frecuentemente los cristales son complicados y bastante irregulares.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

Modelo No. 31.

Tetraedro positivo {111}.

Modelo No. 35.

Cubo {001}

Tetraedro positivo {111}.

Modelo No. 39.

Cubo {001}

Dodecaedro Rómbico {011}

Tetraedro positivo {111}.

$2/m \bar{3}$: Clase Diploédrica: $3A_2$, $4A_3$, $3p$, c .

Ejes cristalográficos:

Los tres ejes Binarios son los Ejes cristalográficos y se orientan igual que los ejes anteriores del Sistema Cúbico.

1. (h0l) y (0kl) Piritoedro positivo y negativo. Forma compuesta de 12 caras pentagonales, cada una de las cuales corta a dos de los ejes a distancias diferentes y es paralelo al tercero.

El cristal debe estar convenientemente orientado, pues la rotación de él en 90° sobre un Eje cristalográfico, convierte el Piritoedro positivo en negativo.

Recordemos que de ser posible, las formas se deben trabajar positivas. Sólo en el caso en que en un mismo cristal existan dos Piritoedros, uno será positivo y el otro negativo (el más desarrollado se elige positivo).

2. (hkl) Diploedro. Se compone de 24 caras que cortan diferentemente a los tres ejes cristalográficos. Es la forma general de esta clase y también puede existir negativa.

Igual que en el caso anterior, la rotación de 90° , convierte al Diploedro positivo en negativo. Debe tenerse esto en cuenta para la correcta orientación del cristal.

También pueden presentarse las siguientes formas combinadas: Cubo, Dodecaedro, Octaedro, Trapezoedro y Triaquisoctaedro.

FIGURA 71. Formas del Sistema Cúbico. Clase Diploédrica.
Pirita. Procedencia: Muzo, Boyacá.



3. (001) Cubo ó Hexaedro.
4. (011) Dodecaedro Rómbico.
5. (111) Octaedro.
6. (hll) Triaquisoctaedro.
7. (hhl) Trapezoedro.

En algunos cristales, estas últimas formas mencionadas pueden aparecer solas y tan perfectamente desarrolladas que no se pueden distinguir de las de la clase Hexaquisoctaédrica.

Esto pasa con frecuencia en la Pirita cuando cristaliza en Cubo y Octaedro.

Gracias a la presencia de estrías ó figuras de corrosión, se puede probar que dichos cristales pertenecen a la clase $2/m \bar{3}$ y no a la $4/m \bar{3} 2/m$.

Cuando se aprecia un cubo de Pirita estriado, se revela la real simetría del cristal (obsérvese que hay $3A_2$ y no $3A_4$).

La Pirita es el mineral más corriente e importante que cristaliza en esta clase.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

Modelo No. 41.

Piritoedro {h0l}.

Modelo No. 42.

Diploedro {hkl}.

Modelo No.45.

Piritoedro {h0l}.

Cubo {001}.

Modelo No. 47.

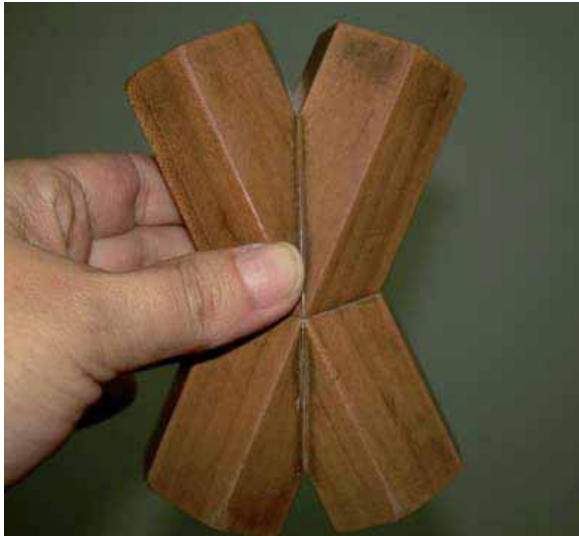
Piritoedro {h0l}

Diploedro {hkl}.

5.17. MACLAS Ò CRISTALES GEMELOS.

Macla es el intercrecimiento de dos ó más cristales, de modo que uno de ellos se puede hacer coincidir con el otro por medio de una reflexión sobre un plano (Plano de macla) ó por una rotación alrededor de un eje (Eje de macla). (fig. 72).

FIGURA 72. Macla de *Estaurolita*.



Los dos cristales quedan con algunos elementos paralelos, pero otros son convergentes y simétricos. Si todos los elementos del cristal son paralelos, no existe macla, sino “Agregado paralelo”. Los ángulos entrantes son comunes en las maclas (fig. 73).

En una macla no hay crecimiento completo de cada uno de los cristales; éste se modifica para permitir la asociación simétrica de las partes.

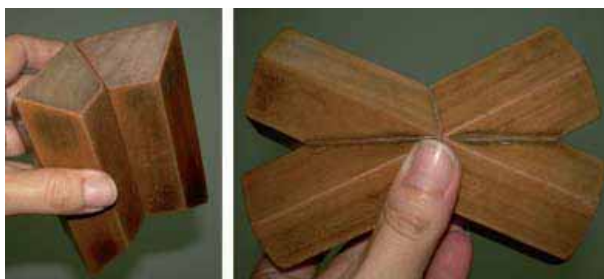
La operación de simetría que hace coincidir los dos cristales se llama Ley de Macla y puede constar del Eje de macla, del Plano de macla ó de ambos.

FIGURA 73 . Macla de Yeso (cola de pescado).
Procedencia: Teruel, España.



El plano que separa los cristales se llama Plano de composición, y de acuerdo a éste, las maclas pueden ser de contacto ó de penetración (fig. 74).

FIGURA 74. Macla de contacto (Aragonito) y de penetración (Estaurolita).



Aragonito.

Estaurolita.

En las maclas de contacto, cada cristal crece a un solo lado del Plano de composición. En estas, el Plano de macla coincide con el de composición, cosa que no ocurre en las de penetración, donde los cristales crecen a ambos lados del Plano de composición.

Según el número de cristales, las maclas pueden ser Simples ó sencillas, si sólo constan de dos elementos (cristales) y Múltiples ó de repetición, si tienen más de dos cristales (fig. 75).

Según sea el Plano de composición, las maclas pueden ser, Cíclicas, si los planos de composición no son paralelos y se van disponiendo en forma cerrada ó cíclica; y Polisintéticas, si los planos de composición son paralelos (fig. 76).

FIGURA 75. Macla simple (Casiterita) y múltiple (Aragonito).



Casiterita.

Aragonito.

FIGURA 76. Macla cíclica (Aragonito).



Para expresar una macla usamos la “Ley de macla”, es decir, indicamos la dirección cristalográfica del Plano de macla y el Eje de macla.

Los procesos que originan maclas son:

Por crecimiento: Es el resultado de un emplazamiento de átomos ó iones sobre la parte exterior de un cristal en crecimiento, de tal forma que la distribución regular de la estructura del cristal se ve interrumpida y ocurren cambios en la estructura que pueden torcer el crecimiento de un cristal y hacer que éste crezca simétrica y no continuamente.

La macla de crecimiento se considera primaria y refleja “accidentes” que tienen lugar durante el crecimiento libre de una sustancia (errores de nucleación).

Se reconocen en las muestras, por la presencia de un límite irregular entre las unidades ó por la interpenetración de ambas.

Por transformación: Representan un maclado secundario porque se presentan en los cristales después de su formación.

Pueden tener lugar cuando una sustancia cristalina formada a una temperatura relativamente alta, se enfría, con lo cual adopta una estructura de simetría distinta de la estable, a temperaturas superiores.

Por ejemplo, el Cuarzo alto (beta) si se enfría por debajo de 573°C , se transforma a Cuarzo bajo (alfa).

En esta transición, la estructura original del Cuarzo superior podría elegir entre dos orientaciones, relacionadas por una rotación de 180° para la distribución estructural Trigonal del Cuarzo inferior. La relación de estas dos orientaciones se conoce con el nombre de Macla de Dauphiné y se expresa como una rotación de 180° alrededor de (0001).

Si el cristal maclado de Cuarzo inferior se calienta por encima de 573° , la macla desaparece y el Cuarzo alto (beta) sin macla, se forma espontáneamente.

Por inversión: Comúnmente ocurre en el polimorfismo. Se forma por condiciones de temperatura y presión, al variar una de ellas, puede pasar un polimorfo a otro. También en un mismo cristal, una parte de él puede cambiar, y la otra no, dando una macla.

Por deslizamiento: Tiene lugar cuando una sustancia cristalina se deforma por aplicación de una tensión mecánica.

Es otro tipo de macla secundaria. Si la tensión produce deslizamiento de los átomos a pequeña escala, se producen cristales maclados; si el desplazamiento es grande, puede ocurrir la ruptura del cristal, sin formación de maclas.

Es muy corriente en los metales y se presenta corrientemente en Calizas transformadas por metamorfismo, ya que un modo de deformación elegido puede ser la macla, pues implica menos energía que el rompimiento del cristal.

También las plagioclasas procedentes de terrenos metamórficos, pueden presentar maclas de deformación.

Algunos ejemplos de la colección de estudio.

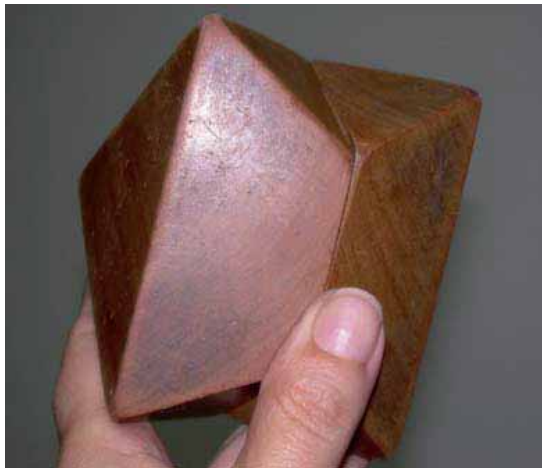
Ejemplo No. 27.

Común en la Espinela y Magnetita.

Macla de contacto, simple.

Plano de macla {111}

El eje Ternario es el eje de macla.



Espinela

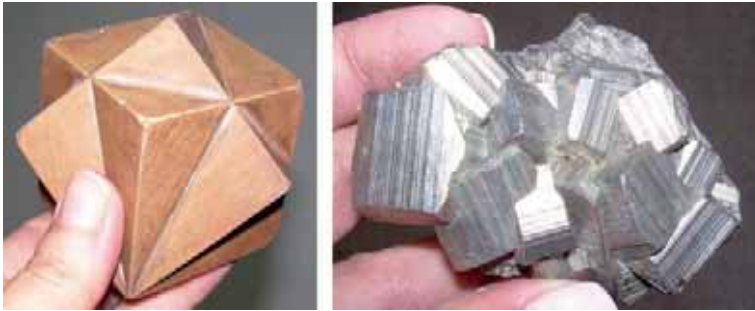
Ejemplo No. 29.

Común en la Fluorita y Pirita.

Puede ser simple ó múltiple, de penetración.

Plano de macla {111}

El eje Ternario es eje de macla.



*Pirita en macla de penetración.
Procedencia: Muzo, Boyacá.*

Ejemplo No. 74.

Común en la Calcita.

Macla de contacto, simple.

Plano de macla {0001}

El eje Ternario es el eje de macla.

Ejemplo No. 98.

Se presenta en Casiterita y Rutilo.

Macla de contacto, simple.

Plano de macla {0kl}.

Ejemplo No. 131.

Nombre “Cola de pescado”.

Común en el Yeso.

Macla de contacto, simple.

Plano de macla {100}.

Ejemplo No. 140.

Macla de Manebach.

Común en el feldespato, ortoclasa.

Macla simple, por contacto.

Plano de macla {001}.

Ejemplo No. 150.

Macla “Polisintética de las plagioclasas”.

Macla múltiple, de contacto.

Plano de macla {010}.

Algunos minerales pueden ser identificados por el tipo de macla que presentan. Entre ellos pueden mencionarse el yeso, los feldespatos potásicos, las plagioclasas, la Casiterita, la Calcita, el Cuarzo, la Pirita, etc (fig. 77).

FIGURA 77. Maclas típicas de: Pirita, Estaurolita (Cruz de hadas), feldespato potásico (macla Carlsbad)



5.18. DESARROLLO DE HÁBITOS Y AGREGADOS CRISTALINOS.

Es de nuestro interés comprender los procesos de crecimiento cristalino y de todas las variables que están implicadas en él, con el ánimo de interpretar las condiciones reinantes en un determinado ambiente de formación de un depósito mineral.

La construcción de cristales euédricos naturales es de poca abundancia. El hecho puede comprobarse en una simple exploración de campo, buscando dichos ejemplares en canteras, excavaciones subterráneas, lechos de una corriente, laderas de un volcán, etc.

Piezas poliédricas bien desarrolladas son interesantes a todos los buscadores de “tesoros naturales”; sus formas exteriores planas nos atraen y cautivan. ¿Quién puede desechar un ejemplar con características geométricas llamativas y sorprendentes?

Estos especímenes raros son motivos de alta valoración y se constituyen en piezas de gran interés para coleccionistas y exposiciones.

5.19. PROCESOS PARA LA FORMACIÓN DE CRISTALES.

Al preguntarnos: ¿De dónde vienen los cristales y porqué su relativa escasez?, debemos considerar los diversos procesos naturales que los originan y las condiciones fisico-químicas, relativamente desfavorables, que reinan en dichos procesos.

Revisando las principales ocurrencias de dichos ejemplares, encontramos que las mejores posibilidades son las siguientes.

1. Ambientes de formación de rocas ígneas intrusivas, bien sea de origen profundo ó relativamente superficial. Me detendré en cada uno de ellos.

En la secuencia de cristalización a partir del magma, podemos por lo general encontrar los más exóticos ejemplares de buenos cristales en algunas rocas básicas, como Gabros por ejemplo, donde la Hornblenda sobresale con Prismas de gran tamaño que pueden

alcanzar hasta unas cuantas decenas de centímetros. La plagioclasa en las rocas profundas tiende a mostrar buenos desarrollos especialmente en fases porfídicas intermedias (Oligoclasa y Andesina en Prismas claros muy bien definidos).

Hacia las fases finales de la secuencia de cristalización, se concentran los fluidos magmáticos, haciéndose abundantes los vapores de agua, Flúor, Cloro, Boro, Litio, Berilio, etc, dando por resultado la formación de bellos ejemplares cristalizados de Turmalinas, Berilos, Topacio, Circones, Espodumenos, etc. La posibilidad de hallarlos en campo es relativamente alta por su “cercana” ocurrencia a la superficie y la acción de los agentes naturales (meteorización y erosión) que cada vez los exponen más.

La presencia de buenos cristales en rocas volcánicas es por lo general muy pobre, por las condiciones propias de su formación; sin embargo, en algunos Basaltos es posible observar piroxenos tipo Augita en cortos cristales prismáticos de contornos muy bien definidos. La emanación de los vapores de Azufre, que por lo regular acompaña a la actividad volcánica, encuentra en su salida a superficie, las condiciones apropiadas para lograr la solidificación cristalizada. Ocurre entonces el proceso de sublimación regresiva, que expone bellos ejemplares en proximidades al cuello volcánico. Cristales de Azufre con perfecto desarrollo de sus formas Ortorrómbicas han sido descritos y reportados desde las zonas volcánicas, especialmente en laderas y proximidades a los cráteres. Estas mismas rocas pueden alojar en sus cavidades y vesículas, minerales secundarios muy bien formados, como zeolitas, carbonatos y silicatos, entre otros.

2. Ambientes sedimentarios de poca profundidad (relativamente cercanos a la costa): Evaporitas.

A partir de soluciones enriquecidas en sales disueltas y por un proceso continuo de evaporación del agua, y su consecuente aumento en saturación, dando finalmente la precipitación de iones que irán formando los cristales.

Son ejemplo de este ambiente particular algunos muy bellos depósitos de Yeso cristalizado en la variedad Selenita, algunas Baritinas tabulares y escasas Celestinas acompañantes. Las formaciones de Halita y algunos carbonatos como la Calcita en cristales espectaculares han sido también encontrados y reportados de este ambiente geológico.

3. Existe otra posibilidad natural para formar cristales y es el ambiente metamórfico. Por cambios en presión y temperatura, especialmente, más los fluidos químicamente activos, se consigue la recristalización de minerales anteriores.

Esta posibilidad, sin embargo, no es tan opcionada como las anteriores, y la ocurrencia de muy buenos ejemplares por este medio, no es tan abundante.

5.20. EXPERIMENTACIÓN.

En el laboratorio se ha podido experimentar la obtención de cristales, con resultados muy satisfactorios. Se consiguen buenos ejemplares de cristales octaédricos de alumbre por el método de evaporación; agujas finísimas de cristales de yodo por sublimación regresiva y muchos otros que requieren ya de un equipo ó cámara especial que permita un control de presiones y temperaturas: Cuarzos, Berilos, Zafiros, Diamantes, etc.

Cualquiera que sea el método elegido, debe tenerse muy en cuenta un buen control de condiciones experimentales que incluya: temperaturas, presiones, naturaleza y concentración de las soluciones, velocidades de cristalización, presencia de impurezas, espacio físico (sustrato), defectos ó imperfecciones cristalinas.

Los resultados no siempre son ejemplos de cristales completos (poliédricos). En muchas ocasiones se consiguen formas muy particulares y agregados cristalinos que parecen imitar otras formas

de la naturaleza, como dendritas, hojas, fibras, agujas, glóbulos, etc, bien sea por intervención de la mano del hombre ó por crecimiento natural.

Se describen a continuación los términos más usados para referir los agregados cristalinos:

- Acicular: Cristales delgados y rectos con forma de agujas. La Estibina es frecuente en esta presentación (fig. 78).

FIGURA 78. Agregado Acicular. Estibina.



- Capilar: Agrupación de cristales que simula el cabello. Se ha visto en excelente desarrollo en formaciones volcánicas (fig. 79).

*FIGURA 79 . Agregado Capilar. Rutilo en Cuarzo.
Procedencia: Minas Gerais, Brasil.*



- Filiforme: El mineral toma el aspecto de alambres ó hebras cortas y curvas. La Plata nativa se presenta así con frecuencia y muchos otros minerales metálicos (fig. 80).

*FIGURA 80. Agregado Filiforme. Plata nativa.
Procedencia: Artificial (Fundición Álvarez)*



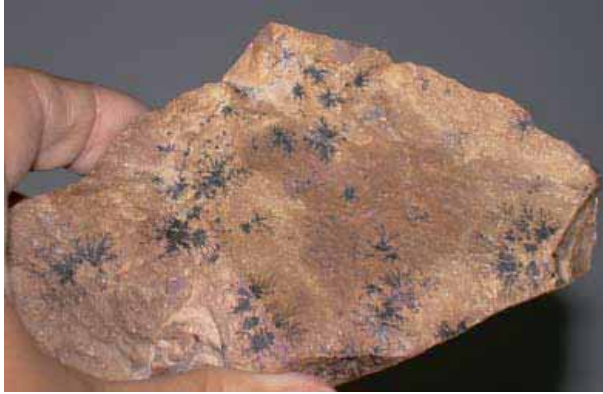
- Hojoso: Presentación con forma de hojas, como lo puede hacer el Talco ó las micas (fig. 81).

*FIGURA 81. Agregado Hojoso. Flogopita.
Procedencia: Ontario, Canadá.*



- Dendrítico: Aparece el mineral con una figura semejante a terminaciones neuronales del cerebro ó a nervaduras de las hojas. Con abundancia se observa en minerales de manganeso, como Pirolusita y Psilomelano (fig. 82).

FIGURA 82. Agregado Dendrítico. Mineral de Manganese
Procedencia: Titiribi, Antioquia.



- Reticular: La formación tiene aspecto de redes. La Cerusita se ha encontrado así (fig. 83).

FIGURA 83. Agregado Reticular. Goethita y Mullita.



Goethita.
Procedencia: Santander.

Mullita (Artificial)
Procedencia: Cristalería Peldar, Antioquia.

- Divergente ó radial: Se forman cristales con apariencia prismática y se disponen en grupos, con una tendencia radial, desde un centro en común (fig. 84).
- Drusa: Superficie, aproximadamente plana, cubierta de cristales.

Son incontables los ejemplos de este tipo, sobresaliendo en abundancia el Cuarzo, la Calcita y muchos sulfuros metálicos como la Pirita, Esfalerita, Galena, etc (fig. 85).

FIGURA 84 . Agregado Radial ó divergente. Pirofilita.
Procedencia: California, U.S.A.



FIGURA 85 . Drusa. Cuarzo (Amatista y Cristal de roca).



Cuarzo (Amatista).



Cuarzo (Cristal de roca).
Procedencia: Segovia, Antioquia.

- Geoda: Si la superficie donde ocurre la cristalización es concóidea, en forma de cavidad que ha sido recubierta por la depositación de un mineral, pero no queda completamente rellena.

Pueden observarse bandas, de Ágata por ejemplo, debido a la depositación sucesiva de material, pero el interior se ve cubierto de cristales en relieve (fig. 86).

FIGURA 86 . Geoda. Cuarzo, var. Calcedonia.



- Columnar: Cristales prismáticos agregados, formando columnas. La Turmalina suele mostrarse así (fig. 87).

FIGURA 87 . Agregado Columnar. Turmalina, var. Chorlo.
Procedencia: Neudeck, Bohemia.



- Fibroso: Los cristales son fibrosos y se disponen paralela ó radialmente. La Serpentina y muchos Anfíboles, muestran esta tendencia (fig. 88).
- Estrellado: Si los cristales radiales, forman grupos parecidos a estrellas (fig. 89). Algunas Wavellitas y Turmalinas se ven así.

FIGURA 88. Agregado Fibroso. Serpentina, var. Crisotilo.
Procedencia: Campamento, Antioquia.



FIGURA 89. Agregado Estrellado. Wavellita
Procedencia: Arkansas, U.S.A.



- Globular: Individuos radiales que forman grupos esféricos ó semiesféricos (fig. 90). La Wavellita y Crisocola aparecen así.

FIGURA 90. Agregado Globular. Hematita.



- Botrioidal: Si los glóbulos se agrupan pareciendo racimos de uvas. Con frecuencia, la Calcedonia constituye este ejemplo (fig. 91).

FIGURA 91. Agregado Botrioidal. Cuarzo, var. Calcedonia.



- Reniforme: Las masas redondas tienen aspecto parecido a un riñón (fig. 92). La Casiterita, se conoce así; También Goethita y Malaquita.

FIGURA 92 . Agregado Reniforme. Casiterita y Limonita.



Casiterita. Procedencia: México.



Limonita.

- Mamilar: Masas grandes y redondas con aspecto de mama (fig. 93). La Fluorita y Limonita pueden encontrarse como ejemplos .

FIGURA 93. Agregado Mamilar. Limonita .
Procedencia: México.



- Coloforme: Agrupa los aspectos botrioidales, mamilares y reniformes. Sin importar el tamaño, son siempre formas esféricas, compuestas de individuos radiales (fig. 94).

FIGURA 94. Agregado Coloforme. Limonita.
Procedencia: Villa de Leyva, Boyacá.



- Exfoliable: Si el mineral exhibe fácilmente su exfoliación. Muchos minerales presentan este agregado (fig. 95).
- Micáceo: Se parece al exfoliable, lo muestran generalmente las micas y a una escala mas fina. la Hematita especular ó Especularita, es un buen ejemplo (fig. 96).

FIGURA 95. Agregado Exfoliable. Lepidolita, Flogopita y Calcita.



1. Lepidolita.



2. Flogopita.

Procedencia: Cucutilla, Norte de Santander.



3. Flogopita.



4. Calcita.

FIGURA 96. Agregado Micáceo. Hematita.
Procedencia: Michigan, U.S.A.



- Laminar: El grupo consta de individuos planos, como placas, superpuestos y adheridos unos a otros (fig. 97).

*FIGURA 97. Agregado Laminar. Talco.
Procedencia: Toribio, Cauca.*



- Tabular: La agrupación parece de cristales con forma de tabla (fig. 98). La Baritina, es frecuente con este desarrollo.

FIGURA 98. Agregado Tabular. Baritina.

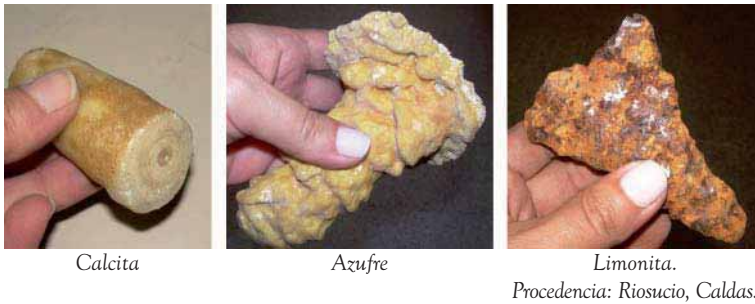


- Estalactítico: El aspecto del mineral es como un cono ó cilindro colgante.

Esta formación ocurre por depositación de material, en cuevas y cavernas, provenientes del goteo desde el techo, por disolución de la roca.

La Calcita y minerales de hierro, se encuentran como ejemplos (fig. 99).

FIGURA 99. Agregado Estalactítico. Calcita, Azufre y Limonita.



- Concéntrico: Capas superpuestas alrededor de un centro en común. Malaquita y Ágata, lo representan (fig. 100).

FIGURA 100. Agregado Concéntrico. Calcita y fluorita.



- Pisolítico: Formaciones esféricas del tamaño de una alverja, contenidas en una matriz fina. Es frecuente la presencia de huellas de las esferas que han salido del conjunto. La Bauxita es característica por este agregado (fig. 101).

FIGURA 101. Agregado Pisolítico. Limonita y Bauxita.



Limonita

Bauxita.
Procedencia: Chile

Bauxita.
Procedencia: Chile

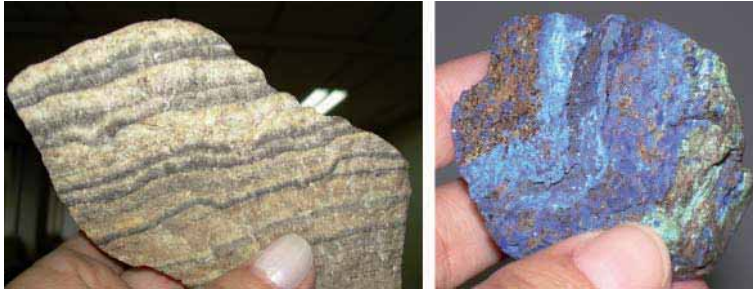
- Ovolítico: Agrupación de esferas muy pequeñas, parecidas a huevos de pescado. Algunas Calizas son típicas, y también la Hematita (fig. 102).

FIGURA 102. Agregado Oolítico. Caliza.



- Banded: Disposition in bands of different colors and textures. Quartz, Gypsum, Malachite and Azurite, represent it (fig. 103).

FIGURA 103. Agregado Bandedo. Calcita y Azurita.



Calcita, var. Travertino.
Procedencia: Villa de Leyva, Boyacá.

Azurita.
Procedencia: U.S.A.

- Rosetted: The disposition of crystals has the form of flower petals. The Gypsum, var. desert rose and the Barite, can show it (fig. 104).

FIGURA 104. Agregado Rosetado. Baritina, Yeso y Limonita.



Baritina.
Procedencia:
California, U.S.A.



Yeso (rosa del desierto).
Procedencia:
Desierto de Túnez.



Limonita.

- Vesicular: Cavidades irregulares de diferentes tamaños y formas, generalmente vacías, resultado de la liberación de fluidos en la actividad volcánica. Los Basaltos vesiculares son comunes (fig. 105).

FIGURA 105. Agregado Vesicular en Basalto.
Procedencia: La Pintada, Antioquia.



- Amigdaloides: Como en el caso anterior, pero las cavidades son de forma semejante a una almendra, y generalmente están rellenas y son de tamaño semejante. También son ejemplo los Basaltos (fig. 106).

FIGURA 106. Agregado Amigdaloides en Basalto.
Procedencia: Risaralda, Caldas.



- Concreciones: Masas formadas por depositación de mineral sobre un núcleo, tomando forma casi aplanada, aunque algunas pueden ser casi esféricas. Muchos ejemplos son de material carbonoso y núcleos de Pirita (fig. 107).

FIGURA 107. Agregado Concrecional, en mineral de Hierro y arcillas.



Mineral de Hierro.

Procedencia: Villa de Leyva, Boyacá.

Concreción arcillosa.

- Cerebral: El aspecto del agregado parece un cerebro. El Aragonito se conoce en esta forma (fig. 108).

FIGURA 108. Agregado Cerebral. Aragonito.

Procedencia: Fredonia, Antioquia.



- Granular: Con aspecto de granos, que pueden ser de muy diversos tamaños (fig. 109). El Olivino y la Cromita son frecuentes en este agregado.

FIGURA 109. Agregado Granular. Cromita y Olivino.



Cromita.

Procedencia: Medellín, Antioquia.

Olivino.

- Agregado Musciforme: El mineral presenta inclusiones oscuras internas que le dan la apariencia de una superficie musgosa (fig. 110).

FIGURA 110. Agregado Musciforme. Ágata musgosa.



- Coraloidal: El mineral se desarrolla con aspecto de un coral. Las formaciones en Aragonito son muy típicas (fig. 111).
- Arborescente: El aspecto del conjunto parece ramificado, con forma de ramas de un árbol.

El cobre nativo se puede encontrar así (fig. 112).

FIGURA 111. Agregado Coraloidal. Aragonito.
Procedencia: Stiria, Austria.



FIGURA 112. Agregado Arborescente. Cobre.
Procedencia: Chile.



- Masivo: Mineral compacto, de forma irregular y sin parecido a nada en particular. Si el aspecto es sin forma definida, debe usarse éste término. Son incontables los ejemplos (fig. 113).

FIGURA 113. Agregado Masivo. Malaquita.



La experimentación, variando las condiciones del ensayo, ha permitido conocer la relación entre algunas de estas formas y el valor de cada variable. Se sabe por ejemplo, que para conseguir cristales de una solución se requiere aumentar la saturación con el propósito de formar núcleos en la solución. Sin embargo, el valor óptimo de saturación debe llegar a un valor crítico y más allá de éste, se van a producir una gran cantidad de defectos en el cristal. Es aquí donde empiezan a aparecer las maclas y crecimientos divergentes, por ejemplo, la Piritita con convergencia de Cubos, la Augita con divergencia de Prismas y formas arborescentes, la Baritina y Azurita en divergencia de fibras; lo mismo pasa en la Calcita y la Estilbita.

La razón de lo anterior es que cuando el núcleo crítico crece demasiado, aumentan las distancias interatómicas y hay una reorganización en el espacio cristalino, dominado por un desorden que se produce al desarrollar la estructura. Se pueden formar también polimorfos metaestables ó materiales amorfos ó de muy baja cristalinidad. Podemos concluir, cuando encontremos cristales con una gran cantidad de defectos, que han crecido en un medio muy sobresaturado.

Si la experiencia de crecer el cristal se desarrolla primero a muy alta sobresaturación, se obtiene un núcleo amorfo. Si la saturación se va disminuyendo, a continuación empiezan a formarse nuevos cristales, adheridos al núcleo amorfo como sustrato.

Experimentando en el laboratorio el crecimiento de sulfato cálcico, usando como reactivos cloruro de calcio y ácido sulfúrico, con concentraciones desde 0.1 hasta 2.5 N. la nucleación tiene lugar a altas sobresaturaciones. Primero se obtiene una forma globular de muy baja cristalinidad, análoga al sulfato de calcio amorfo. Después de 24 horas, aparecen glóbulos recubiertos de cristales con morfologías radiales. Una sección de este agregado muestra en el centro un núcleo amorfo globular (precursor), seguido por pequeños cristales radiales y luego cristales radiales

de mayor tamaño. A medida que disminuye la sobresaturación, va aumentando el tamaño de los cristales. A medida que crecen los cristales, los hábitos tienden a ser más sencillos, abandonándose las formas complejas, que son típicas de altas sobresaturaciones.

La nucleación puede ser homogénea y heterogénea. La homogénea se da abundantemente en magmas. La heterogénea sucede cuando hay un sustrato, que puede ser una fractura ó vena, en cuyas paredes, va a cristalizar la fase ó un cristal de generación anterior. Las paredes de grietas son ejemplo de nucleación heterogénea; allí ocurre el crecimiento desde las paredes hacia el centro, dando morfologías en diente. En geodas ocurre un crecimiento de cristales Romboédricos de Calcita sobre otros, también de Calcita, anteriormente Escalenoédricos. En el Cuarzo también ocurre formación de cristales de segunda generación, sobre los de la primera. Los de primera son prismáticos, y sobre las caras negativas de los Prismas se forman cristales de segunda generación pseudopiramidales, resultando cristales en cetro. Se conocen ejemplos de primera generación de cristales de Calcedonia sobre los que se incrustan cristales radiales de Cuarzo, dando formas fibroso-radiales. Puede haber una tercera generación de cristales de Cuarzo con distinta morfología sobre todo lo anterior. Las distribuciones, regularmente orientadas sobre el cristal previo ó sustrato, se conocen como epitaxias. Si sucede entre polimorfos, por ejemplo, crecimiento de Cubos de Pirita sobre el hábito “cresta de gallo” de la Marcasita, se llama syntaxia.

La morfología cristalina es función de los mecanismos de crecimiento. Cada tipo de crecimiento se rige por unas leyes cinéticas distintas, por lo que van a dar lugar a distintas morfologías según el caso. Por eso, a partir de ellas podemos conocer cómo ha evolucionado el crecimiento en sus distintas fases.

La velocidad de crecimiento está controlada por la rugosidad de la interfase y la fuerza conductora de la cristalización.

El crecimiento del cristal puede ser continuo, por nucleación bidimensional ó por dislocaciones helicoidales. Las caras con alta velocidad de crecimiento tienden a desaparecer.

En el crecimiento continuo, el gradiente de concentración va a ser más ó menos homogéneo en todo el cristal, sea cual sea la dirección considerada. Las morfologías obtenidas son: formas redondeadas, esferulíticas, botrioidales (las más comunes), hábitos dendríticos, superficies curvadas, crecimientos cuarteados, etc.

Si el crecimiento es por nucleación bidimensional, existe un gradiente de concentración desde las aristas (donde es mayor) hacia el centro del cristal (donde es menor). Se obtienen morfologías en forma de tolvos ó esqueléticas. Es común también que aparezcan agregados dendríticos.

Si el crecimiento es por dislocación helicoidal, que ocurre en el centro del cristal, lo expande hacia los bordes, generando escalones.

Si la interfase es rugosa, el mecanismo de crecimiento es continuo. Si la interfase es lisa, el mecanismo de crecimiento es por nucleación bidimensional ó por dislocaciones helicoidales.

Cuando las dislocaciones son en una sola dirección, se dan morfologías aciculares; cuando sucede en dos direcciones, las morfologías son tabulares. Cuando hay caras lisas, las unidades de crecimiento tienen que buscar aquellos puntos donde existan rincones, escalones, etc, en la superficie.

El mecanismo de crecimiento se desarrolla capa a capa; hasta que no se completa una capa, no empieza a llenarse la siguiente.

En superficies rugosas, tendremos cristales con morfologías mal definidas y el hábito depende de la simetría del aporte.

Toda cara tendrá una rugosidad distinta y por tanto una velocidad de crecimiento también distinta. Cuando hay caras muy rugosas, las unidades de crecimiento se van a poder situar prácticamente en cualquier punto (porque hay muchos escalones, huecos, etc).

En resumen, la formación de cristales poliédricos se da por dislocaciones, y sus hábitos dependen de dos factores:

1. El desarrollo relativo de unas caras con respecto a Otras. Por ejemplo, los cristales cúbicos pueden adoptar formas cúbicas, prismáticas ó laminares (aplanadas), dependiendo del grado de desarrollo de caras.
2. La combinación de los distintos tipos de caras. Por ejemplo, la variación de la morfología de diversos cristales cúbicos, dependiendo de cuál ha sido la combinación y desarrollo de las caras.

La presencia de impurezas puede hacer variar la velocidad de la nucleación, aumentándola ó disminuyéndola, debido a que se afectan tanto los factores cinéticos como los termodinámicos de la cristalización. Experimentalmente se ha visto que la presencia de impurezas, con más frecuencia, inhibe la nucleación, más que favorecerla. Las impurezas modifican la velocidad de crecimiento de unas caras con respecto a otras, porque existe una adherencia selectiva entre ellas, y por lo tanto, las impurezas pueden variar la morfología de las caras pudiendo dar zonaciones composicionales, y si son impurezas cromógenas, se distinguen bien por el color.

Cuando la morfología es de un prisma acabado en un pinacoide, las impurezas se concentran en un cono de revolución en torno al eje a.

Si aparecen contactos rectos, esto indica que el descenso de la temperatura ha sido uniforme. Si los contactos son irregulares, hubo un descenso no controlado de la temperatura, por lo que habrá fluctuaciones en la velocidad de crecimiento del plano receptor de la impureza y probablemente también en la sobresaturación.

Al aumentar la cantidad de impurezas, la velocidad de crecimiento de una cara determinada puede llegar a ser cero.

En el agua de mar se forman oolitos compuestos por cristales fibrosos de Aragonito (fig. 114). El agua de mar contiene iones Mg^{+2} disueltos, pero el Aragonito así formado no lleva en su composición Mg^{+2} .

FIGURA 114. Oolitos de Aragonito.



Los oolitos así formados constan de un núcleo central, por ejemplo de sílice con cristales de Aragonito fibroso-radiales adheridos a él de forma tangente.

El Aragonito es metaestable a la presión ambiente, pero en el agua de mar no precipita Calcita sino Aragonito.

La explicación que se ha dado a este hecho es que existen impurezas que inhiben la formación de Calcita y por eso lo que se forma es Aragonito.

En Calcitas que crecen en ambientes con alto magnesio se observa que la variación del magnesio se refleja en la evolución de la morfología de los cristales.

La secuencia observada es: la Calcita empieza nucleando como esfera, cuando la cantidad de magnesio es alta; a medida que éste va disminuyendo, se forman zonas llamadas planos F de partición. A partir de estas zonas y siempre con la cantidad de magnesio disminuyendo, se desarrollan las caras del Romboedro típico de una Calcita.

En Calcita con bajo magnesio, no se ven formas esféricas, mas bien, se desarrollan caras desde el principio. El Aragonito sin magnesio forma esferulitas.

Los oolitos se forman por precipitación de la Calcita en torno de núcleos existentes en aguas poco profundas y fuertemente agitadas.

Los oolitos están en el intervalo de 0.1 a 1.0 mm de diámetro. Son esféricos y muestran estructuras radiales y concéntricas que recuerdan huevos de peces.

Generalmente se forman alrededor de núcleos como fragmentos de conchas de moluscos, pelets ó granos de arena cuarcíferas. Crecen químicamente bajo la influencia de las olas en ambientes marinos poco profundos.

Los pelets son agregados homogéneos bien redondeados de caliza microcristalina y tamaño comprendido entre 0.03 y 0.2 mm de diámetro. Proceden principalmente de las heces de gusanos, moluscos y crustáceos.

Las formas globulares de Malaquita y Ópalo tradicionalmente se han explicado por cristalización a partir de un coloide.

Las morfologías dendríticas son debidas a alta sobresaturación y ocurren para un Factor Jackson (*) entre 3.2 y 4.0. Si este factor es

(*) Es un factor de la entropía de superficie y es función del número de enlaces de una partícula paralelos a una superficie de referencia, del número de enlaces totales de una partícula y de la entalpía de solidificación.

menor de 3.2 se dan morfologías esferulíticas y alargadas, formando triquitos, que son como fibras de lana de vidrio que implican un alargamiento grande, en una dirección, por la gran cantidad de impurezas. Estas formas, en general son morfologías mal definidas y muy diferentes a la forma de equilibrio.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Imagen obtenida por rayos x, para un cristal de Berilo...	13
FIGURA 2.	Cristales cúbicos de Halita y Pirita.....	13
FIGURA 3.	Cristales euedrales de Cuarzo.....	14
FIGURA 4.	Cristales subedrales de feldespato y granate.....	15
FIGURA 5.	Microfotografía de una roca básica.....	16
FIGURA 6.	Cristales gigantes de Cuarzo.....	17
FIGURA 7.	Cristal gigante de Cuarzo lechoso.....	18
FIGURA 8.	Esmeraldas colombianas.....	20
FIGURA 9.	Componentes esenciales de una Pegmatita.....	21
FIGURA 10.	Cristal de Moscovita.....	22
FIGURA 11.	Cuarzo, var. Calcedonia. Geoda Con cristales de Cuarzo en el interior.....	23
FIGURA 12.	Geoda gigante en la mina "Pulpi".....	24
FIGURA 13.	Almacén de Cuarzo, var. Amatista, en Brasil.....	25
FIGURA 14.	Ópalo: en muestra de mano y microfotografía electrónica de barrido.....	29
FIGURA 15.	Crecimiento cristalino a partir de una solución sobresaturada.....	32
FIGURA 16.	Empaquetamiento atómico de la Halita.....	34
FIGURA 17.	Formación de cristales diferentes, a partir de la misma celda unitaria.....	36
FIGURA 18.	Estructura interna de la Calcita.....	37
FIGURA 19.	Objeto duplicado por rotación.....	38
FIGURA 20.	Los dos casos extremos de simetría rotacional.....	39
FIGURA 21.	Prueba de inexistencia de un eje de simetría pentagonal	40
FIGURA 22.	Edificio cristalino octaédrico.....	41
FIGURA 23.	Ejes de simetría, vistos en planta.....	42
FIGURA 24.	Plano de simetría.....	43
FIGURA 25.	Ejes de inversión, en volumen.....	45
FIGURA 26.	Representación ortogonal de un eje Monario perpendicular al Plano de proyección.....	63
FIGURA 27.	Circunferencia de proyección para un eje Binario.....	63
FIGURA 28.	Representación ortogonal de un eje Binario simple, perpendicular al Plano de proyección.....	64
FIGURA 29.	Circunferencia de proyección para un eje Ternario.....	64

FIGURA 30.	Representación ortogonal de un eje Ternario simple, perpendicular al Plano de proyección.....	65
FIGURA 31.	Circunferencia de proyección para un eje Cuaternario ..	65
FIGURA 32.	Representación ortogonal de un eje Cuaternario simple, perpendicular al Plano de proyección	66
FIGURA 33.	Circunferencia de proyección para un eje Senario.....	66
FIGURA 34.	Representación ortogonal de un eje Senario simple, perpendicular al Plano de proyección.....	67
FIGURA 35.	Representación ortogonal de un eje de inversión Monario, perpendicular al Plano de proyección	68
FIGURA 36.	Representación ortogonal de un eje de inversión Binario, perpendicular al Plano de proyección	69
FIGURA 37.	Representación ortogonal de un eje de inversión Ternario, perpendicular al Plano de proyección	70
FIGURA 38.	Representación ortogonal de un eje de inversión Cuaternario, perpendicular al Plano de proyección	71
FIGURA 39.	Representación ortogonal de un eje de inversión Senario, perpendicular al Plano de proyección	72
FIGURA 40.	Representación ortogonal de los Planos de simetría.....	74
FIGURA 41.	Proyección ortogonal de 2/m, 4/m y 6/m.....	75
FIGURA 42.	Características de los Ejes cristalográficos para cada uno de los Sistemas Cristalinos.....	78
FIGURA 43.	Corte y paralelismo de caras y ejes	82
FIGURA 44.	Caras de un cristal y sus cortes con los ejes a, b y c	83
FIGURA 45.	Intersecciones de caras con los tres Ejes cristalográficos.	84
FIGURA 46.	Ejes cristalográficos para el Sistema Hexagonal	86
FIGURA 47.	Concepto de “Forma Cristalina”	88
FIGURA 48.	Forma cristalina: Pinacoide	90
FIGURA 49.	Forma cristalina: Prisma	91
FIGURA 50.	Forma cristalina: Bipirámide	91
FIGURA 51.	Forma cristalina: Trapezoedro trigonal	92
FIGURA 52.	Forma cristalina: Escalenoedro.....	92
FIGURA 53.	Forma cristalina: Romboedro.....	93
FIGURA 54.	Forma cristalina: Cubo ó hexaedro	93
FIGURA 55.	Forma cristalina: Octaedro	94
FIGURA 56.	Forma cristalina: Dodecaedro Rómbico.....	94
FIGURA 57.	Forma cristalina: Trapezoedro	95
FIGURA 58.	Forma cristalina: Tetraedro.....	95
FIGURA 59.	Forma cristalina: Piritoedro.....	96

FIGURA 60.	Formas en Cristales Triclínicos	99
FIGURA 61.	Formas en Cristales Monoclínicos	101
FIGURA 62.	Formas en cristales Cristales Ortorrómbicos	104
FIGURA 63.	Formas en cristales Tetragonales.....	106
FIGURA 64.	Ejes cristalográficos Hexagonales.....	108
FIGURA 65.	Cristales Hexagonales - División Hexagonal.....	109
FIGURA 66.	Cristales Hexagonales - División Romboédrica	112
FIGURA 67.	Trapezoedro trigonal izquierdo y derecho	113
FIGURA 68.	Cuarzo izquierdo y derecho	114
FIGURA 69.	Formas en cristales Cúbicos - Clase Hexaquisoctaédrica.	115
FIGURA 70.	Formas en cristales Cúbicos - Clase Hexaquistetraédrica	118
FIGURA 71.	Formas en cristales Cúbicos- Clase Diploédrica	120
FIGURA 72.	Macla de Estauroлита	122
FIGURA 73.	Macla en Yeso (Cola de pescado).....	123
FIGURA 74.	Macla de contacto (Aragonto) y de penetración (Estauroлита)	123
FIGURA 75.	Macla simple (Casiterita) y múltiple (Aragonito)	124
FIGURA 76.	Macla cíclica (Aragonito)	124
FIGURA 77.	Maclas típicas de Pírita, Estauroлита y feldespato de potasio	128
FIGURA 78.	Agregado Acicular. Estibina.....	132
FIGURA 79.	Agregado Capilar. Rutilo en Cuarzo.	132
FIGURA 80.	Agregado Filiforme. Plata nativa.	133
FIGURA 81.	Agregado Hojoso. Flogopita.	133
FIGURA 82.	Agregado Dendrítico. Manganeso.	134
FIGURA 83.	Agregado Reticular. Limonita y Mullita.	134
FIGURA 84.	Agregado Radial ó Divergente. Pirofilita.	135
FIGURA 85.	Agregado en Drusa. Cuarzo (Amatista y Cristal de roca)..	135
FIGURA 86.	Agregado en Geoda. Cuarzo, var. Calcedonia.	136
FIGURA 87.	Agregado Columnar. Turmalina.	136
FIGURA 88.	Agregado Fibroso. Serpentina (Crisotilo).....	137
FIGURA 89.	Agregado Estrellado. Wavellita.	137
FIGURA 90.	Agregado Globular. Hematita.	137
FIGURA 91.	Agregado Botrioidal. Cuarzo (Calcedonia).	138
FIGURA 92.	Agregado Reniforme. Casiterita y limonita.....	138
FIGURA 93.	Agregado Mamilar. Limonita.	139
FIGURA 94.	Agregado Coloforme. Limonita.	139
FIGURA 95.	Agregado Exfoliable. Lepidolita, Flogopita y Calcita.	140
FIGURA 96.	Agregado Micáceo. Hematita.	140
FIGURA 97.	Agregado Laminar. Talco.....	141
FIGURA 98.	Agregado Tabular. Baritina.	141

FIGURA 99. Agregado Estalactítico. Calcita, Azufre y Limonita.	142
FIGURA 100. Agregado Concéntrico. Calcita y Fluorita.	142
FIGURA 101. Agregado Pisolítico. Limonita y Bauxita.	143
FIGURA 102. Agregado Oolítico. Caliza.	143
FIGURA 103. Agregado bandeado. Calcita (travertino) y Azurita.	144
FIGURA 104. Agregado Arrosetado. Baritina, Yeso y Limonita.	144
FIGURA 105. Agregado Vesicular. Basalto.	145
FIGURA 106. Agregado Amigdaloides. Basalto.	145
FIGURA 107. Agregado Concrecional. Limonita.	146
FIGURA 108. Agregado Cerebral. Aragonito.	146
FIGURA 109. Agregado Granular. Cromita y Olivino.	147
FIGURA 110. Agregado Musciforme. Ágata.	147
FIGURA 111. Agregado Coraloidal. Aragonito.	148
FIGURA 112. Agregado Arborescente. Cobre.	148
FIGURA 113. Agregado Masivo. Malaquita.	148
FIGURA 114. Oolitos de Aragonito.	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Los 32 elementos de simetría y sus combinaciones posibles	76
Tabla 2.	Las 32 Clases Cristalinas	77
Tabla 3.	Las 32 Clases de cristales y su simetría característica	98

BIBLIOGRAFÍA

- Bayley W. S, 1910, Elementary Crystallography, MaGraw-Hill Book Company, 241 págs.
- Cornelius Klein and Cornelius S. Hurlbut, Jr, 1988, Manual De Mineralogía, Editorial Reverté S.A, España, 368 págs.
- Cristaux Geants (Exposition), 1983, Museum National D'Historie Naturelle, París, 6 págs.
- Dud'a R , Rejl L, Y Slivka, D, 1986, La Gran Enciclopedia de los Minerales, Editorial Susata, 520 págs.
- Fabregat, G, Francisco, 1964, El estudio de un cristal, Editorial Helio, México, 254 págs.
- Fersman, A. E, 1966, Geoquímica Recreativa, segunda edición, Moscú, 483, págs.
- Flint, E, Principios de Cristalografía, Editorial Paz, Moscú, 249 págs.
- Heno Vázquez, Martha, 1987, Notas de Mineralogía. Parte I. Trabajo de Promoción presentado como requisito parcial para la categoría de Profesora Asistente, 176 págs.
- Holden Alan and Phylis Morrison, 1982, Crystals and Cristal Growing, Cambridge, Massachussets, 318 págs.
- Huang Walter t, 1968, Petrología, McGraw-Hill Book Company, New York, 546 págs.

- Jaroslav Bauer, 1981, Guía Básica de los Minerales, Editorial Omega S.A, Barcelona, 214 págs.
- Montague G. Butler, E. M, 1918, A manual of Geometrical Crystallography, 155 págs.
- Rath, R, 1972, Cristalografía, Editorial Cometa, Madrid, España, 206 págs.
- Restrepo, J. J, 1976, Inédito.
- Rivera, A. 2000. «Gigantezco hallazgo en una mina de Almería «El país. Sbdo 10-6-2000. Pág 33. Disponible en <http://www.geocities.com/geo-info/geo/geoda/geoda.htm>, consulta: 28 de mayo de 2007.
- Roso De Luna, 1943, Cristalografía, Fundamentos geométricos de morfología y estructuras cristalinas, Escuela especial de Ingeniería de Minas, Madrid.
- Symes, R. F, and Harding, R. R, 1991, crystals and Gems. 63 págs.
- Symes, R. F, and Staff of the natural History museum, London, 1988, Rocks and Minerals, 63 págs.
- Trujillo, U. Gabriel, 1990, Inédito.

INDICE ANALÍTICO

A			
Ágata	23, 135, 142, 147, 160	Agregado tabular	141
Ágata musgosa	147	Agregado vesicular	145
Agregado acicular	132	Agregados cristalinos	10, 12, 30, 128, 131, 132
Agregado amigdalóide	145	Analcima	116
Agregado arborescente	148	Andalucita	105
Agregado arrosetado	144	Andesina	130
Agregado bandeado	144	Anédrico	14
Agregado capilar	132	Ángulos entrantes	122
Agregado colóforme	139	Antofilita	105
Agregado columnar	136	Apatito azul	26
Agregado concéntrico	142	Aragonito	105, 123, 124, 146, 147, 148, 153, 154
Agregado coraloidal	148	Arena cuarcífera	154
Agregado dendrítico	134	Augita	130, 149
Agregado divergente	135	Azufre	33, 81, 82, 105, 130, 142
Agregado en drusa	159	Azurita	103, 144, 149
Agregado en geoda	136		
Agregado estalactítico	142		
Agregado estrellado	137	B	
Agregado exfoliable	140	Baritina	105, 131, 141, 144, 149, 159
Agregado fibroso	137	Basalto amigdalóide	145
Agregado filiforme	133	Basalto vesicular	145
Agregado globular	137	Bauxita	143
Agregado granular	147	Berilo	13, 19, 21, 26, 27, 28, 109, 110, 130, 131
Agregado hojoso	133	Berilo azul	26
Agregado laminar	141	Berilo rosado	26
Agregado masivo	148	Berilo var. Esmeralda	
Agregado micáceo	140	Bipiramidal	27, 97, 104, 106, 109
Agregado musciforme	147	Bipiramidal rómbica	97, 104
Agregado oolítico	143	Bipirámide	91, 97, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 115
Agregado paralelo	122	Bipirámide dihexagonal	110, 111
Agregado pisolítico	143	Bipirámide ditetragonal	107
Agregado radial	135		
Agregado reniforme	138		
Agregado reticular	134		

Bipirámide rómbica	97, 105, 106	Clorita	103
Bipirámide tetragonal		Cobre	116, 147, 148
de primer orden	107, 108	Cola de pescado	123, 127
Bipirámide tetragonal		Coloides	29
de segundo orden	107, 108	Concreciones	146
C		Convenciones de simetría	
Calcantita	99, 100	Cordierita	105
Calcita	26, 28, 36, 37, 93, 112, 113, 127, 128, 131, 134, 140, 142, 144, 149, 150, 153, 154	Corindón	90, 112, 113
Calcita, var. Espato de islandia	93	Corindón, var. Zafiro	
Calcita, var. Travertino	142, 144	Crecimiento cristalino	32, 128, 157
Caliza	126, 143, 154	Criptocristales	16
Caliza microcristalina	154	Cristales gemelos	122
Caolinita	103	Cristales gigantes	16, 17, 18, 19, 23, 26
Casiterita	107, 124, 127, 128, 138	Cristalografía	11, 15, 96
Celdas unitarias	36, 41	Cromita	146, 147
Centro de simetría	37, 43, 44, 46, 47, 48, 53, 54, 57, 59, 60, 67, 73, 74, 88, 89, 99	Cruz de hadas	128
Cerebral	146	Cuarzo	14, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 98, 114, 125, 128, 131, 132, 134, 135, 136, 138, 144, 150
Cerusita	134	Cuarzo ahumado	17, 23, 27
Chabacita	112	Cuarzo alfa	114
Cinabrio	114	Cuarzo beta	
Circón	22, 29, 107, 130	Cuarzo hialino	
Clase bipiramidal dihexagonal	109	Cuarzo morrión	26, 27
Clase bipiramidal ditetragonal	106	Cuarzo, var. Amatista	25
Clase bipiramidal rómbica	104	Cuarzo, var. Calcedonia	23
Clase diploédrica	119, 120	Cuarzo, var. Cristal de roca	17
Clase escalenoédrica hexagonal	111	Cubo	88, 89, 90, 93, 98, 111, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 149, 150
Clase hexaquisoctaédrica	115, 120	D	
Clase hexaquistetraédrica	117, 118	Diáfanos	18
Clase pinacoidal	99	Diamante	18, 116, 131
Clase prismática	102	Diamante cullinam	18
Clase trapezoédrica trigonal	113	Diploedro	96, 120, 121
Clases cristalinas	75, 77, 96, 98, 161	Diploedro negativo	120
		Diploedro positivo	120
		Dodecaedro deltoidal	96, 118

Dodecaedro rómbico	94, 116, 117, 118, 119, 120	Escalenoedro hexagonal	92
Dislocaciones helicoidales	151	Esfalerita	98, 119, 134
Domo	96	Esfena	103
E		Esfenoide	96
Edificio cristalino	41	Esferulítica	151, 155
Eje binario	41, 42, 47, 48, 54, 59, 60, 63, 64, 69, 73, 98, 102, 157	Espinela	126
Eje cuaternario	41, 42, 45, 47, 48, 65, 66, 70, 98, 107, 158	Esodumeno	130
Eje de inversión	44, 68, 111	Estaurolita	101, 122, 123, 128
Eje de inversión cuaternario	41, 42, 45, 47, 48, 65, 66, 70, 98, 107	Estibina	105, 132
Eje de inversión monario	45, 47, 53, 68, 99	Euédrico	14, 129
Eje de macla	122, 124, 126, 127	Evaporitas	130
Eje de simetría	38, 40, 46, 65, 101, 109, 111	F	
Eje monario	41, 42, 47, 63, 68	Factor jackson	154
Eje senario	41, 42, 47, 48, 66, 67, 71, 98	Fallas	28
Eje ternario	41, 42, 48, 54, 55, 60, 64, 65, 73, 92, 113, 126, 127	Feldespatos	14, 16, 21, 100, 128
Ejes cristalográficos	75, 78, 81, 82, 84, 85, 86, 89, 97, 98, 99, 101, 103, 104, 106, 108, 110, 111, 115, 116, 117, 118, 119, 120	Figuras de corrosión	87, 121
Elemento de simetría	37, 42, 43, 61, 62	Flogopita	133, 140
Enantiomorfo	42	Fluorita	116, 127, 139, 142
Enstatita	105	Forma cristalina	85, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 158,
Entalpia	154	Fractura concoidea	30
Entropía	154	Fracturas	28
Epidota	103	Franklinita	26
Epitaxias	150	Fulgurita	29, 30
Equivalencias de ejes	53, 59, 62, 72	G	
Escalenoedro	92, 111, 112	Galena	88, 116, 134
		Geles	29
		Gérmenes	32
		Goethita	105, 134, 138
		Granate	14, 94, 95, 116
		Grupo anfíbol	103
		Grupo piroxeno	103
		H	
		Hábito	87, 102, 104, 128, 150,

	151, 152	Macla simple	124, 128
Halita	13, 14, 31, 34, 35, 88, 93, 116, 131	Maclas	122, 123, 124, 126, 128, 149
Hematita	113, 137, 139, 140, 143	Magnesita	113
Hematita, var. Especularita	139	Magnetita	94, 126
Heulandita	103	Malaquita	103, 138, 142, 144, 148, 154
Hexaedro	93, 96, 116, 118, 120	Marcasita	105, 150
Hexaquisoctaedro	96, 97, 116	Masas botrioidales	151
Hexaquisoctaédrica	97, 115, 120	Masas estalactíticas	30
Hexaquistetraédrica	117, 118	Masas mamilares	30
Hornblenda	129	Metaestables	143
I		Metamíctico	29, 30
Impurezas	131, 152, 153, 155	Mica	21, 22, 26, 103, 133, 139
Indíces de miller	84, 85, 89, 97	Microclina	21, 27, 100
L		Microclina, var. amazonita	27
Lauegrama	13	Microfotografía	16, 29
Lechatelierita	29, 30	Minerales metálicos	133
Lepidolita	149, 150	Mineraloide	29, 30
Ley de macla	122, 124	Moléculas integrales	35
Limonita	138, 139, 142, 143, 144	Mullita	134
M		N	
Macizos graníticos	27	Nódulo	23, 33
Macla carlsbad	128	Notación hermann mauguin	47, 48, 49, 54, 57, 102
Macla cíclica	124	Notación simple	46, 47, 48, 55, 57
Macla de dauphiné	125	Nucleación	33, 125, 149, 150, 151, 152
Macla de contacto	123, 126	Nucleación heterogénea	150
Macla de penetración	127	Nucleación homogénea	150
Macla de manebach	128	Núcleo amorfo	149
Macla múltiple	128	O	
Macla polisintética	123, 128	Octaedro	94, 116, 117, 118, 120, 121
Macla polisintética de las		Oligoclasa	130
plagioclasas	100, 126, 128	Olivino	16, 105, 146, 147
Macla primaria	125	Ópalo	29, 154
Macla secundaria	126	Operación de simetría	67, 122

Oro	116	Polimorfos	149, 150
Oropimente	103	Prisma	22, 90, 91, 109, 112, 152
Ortosa	103	Prisma de cuarto orden	103
		Prisma de primer orden	102, 103, 104, 105
P		Prisma de segundo orden	103, 105
Pedión	96	Prisma de tercer orden	100, 101, 103, 105, 106
Pegmatitas	20, 21, 22	Prisma dihexagonal	110, 112
Pegmatitas complejas	21, 22	Prisma ditetragonal	107, 108
Pelets	154	Prisma ditrigonal	113, 114
Pinacoide	90, 100, 102, 109, 113	Proyecciones ortogonales	48, 53, 62
Pinacoide basal	22, 100, 101, 102, 103, 110, 111, 112	Pseudomorfos	30
Pinacoide de cuarto orden	100, 101	Psilomelano	133
Pinacoide de primer orden	100, 101		
Pinacoide de segundo orden	100, 101	R	
Pinacoide de tercer orden	100, 101	Rayos x	13, 16, 29, 30, 81, 82
Pinacoide frontal	100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108	Recristalización	31, 131
Pinacoide lateral	100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108	Red cúbica	33
Pirita	13, 14, 19, 88, 96, 98, 120, 121, 127, 128, 134, 146, 149, 150	Rejalgar	103
Piritoedro	96, 119, 120, 121	Relaciones axiales	81, 82
Piritoedro negativo	119, 120	Roca básica	16
Piritoedro positivo	119, 120	Rocas ígneas intrusivas	33, 129
Pirofilita	135	Rodocrosita	113
Pirolusita	133	Rodonita	26, 100
Piroxeno	16, 102, 103, 130	Romboedro	93, 111, 112, 113, 115, 154
Plagioclasa	16, 100, 126, 128, 130	Rotoinversión	76, 92
Plano de composición	123	Rutilo	107, 127, 132
Plano de macla	122, 124, 126, 127, 128	S	
Plano de simetría	42, 43, 47, 49, 50, 53, 54, 58, 67, 72, 73, 74, 76, 91, 98, 102, 104	Semillas	32
Plata	24, 25, 116, 133	Serpentina	136, 137
Pliegues	28	Serpentina, var. Crisotilo	137
Poliédrico	131	Siderita	113
		Sienita nefelinica	22
		Sillimanita	105
		Silvina	116

Simetría	13, 35, 43, 50, 56, 59, 66, 67, 72, 76, 88, 91, 96, 101, 106, 109, 115, 122, 125	Trapezoedro	92, 95, 113, 114, 115, 116, 117, 120
Simetría pentagonal	39, 40,	Trapezoedro trigonal	92, 113, 114, 115
Sintaxia	150	Triaquisoctaedro	96, 116, 120
Sistema cúbico	48, 49, 50, 56, 77, 78, 97, 115, 118, 119, 120	Triaquistetraedro	118
Sistema hexagonal	48, 51, 52, 55, 58, 60, 75, 79, 81, 85, 86, 97, 108, 111	Triquitos	155
Sistema monoclinico	52, 53, 56, 59, 80, 81, 97, 101	Turmalina	26, 91, 136
Sistema rómbico	48, 52, 56, 59, 60, 79, 81	Turmalina, var. Chorlo	136
Sistema tetragonal	48, 49, 50, 51, 59, 77, 78, 97, 106	Turquesa	100
Sistema triclinico	53, 57, 61, 80, 81, 97, 99	U	
Smithsonita	113	Uraninita	116
Solución sobresaturada	32	V	
Subedrico	14	Vidrios	29, 30
T		W	
Talco	103, 133, 141	Wavellita	137
Tennantita	119	Willemita	26
Tetraedrita	119	Wollastonita	100
Tetraedro	95, 117, 119	Y	
Tetraedro negativo	117	Yeso	24, 25, 103, 123, 127, 128, 131, 144
Tetraedro positivo	117, 119	Z	
Tetraquishexaedro	96, 116, 118	Zafiro	
Topacio	105, 130	Zona de cristal	99, 101, 102
Transformación de notaciones	54, 57		

INDICE ONOMÁSTICO

A

Ágata
Agua
Albani
Almandino
Almería
Alpes Suizos
Amatista
Amazonita
Amgstron
Analcima
Andalucita
Andesina
Anfiboles
Antimonio
Antofilita
Apatito
Aragonito
Aristóteles
Arsénico
Augita
Avestruz
Azufre
Azurita

B

Baritina
Basalto
Bauxita
Berilo
Binario

Bipirámide
Bipirámide dihexagonal
Bipirámide ditetragonal
Bipirámide rómbica
Bipirámide tetragonal de primer orden
Bipirámide tetragonal de segundo orden
Birmania
Black Hills
Boro
Brasil

C

Calcantita
Calcedonia
Calcita
Caliza
Canadá
Carlsbad
Casiterita
Cerebro
Cerusita
Cesio
Chabacita
Chorlo
Cinabrio
Circón
Cleopatra
Clorita
Cloro

Cobre

Cola de pescado

Colombia

Columbita

Cordierita

Cordillera Oriental

Corindón

Crisocola

Crisolito

Cristal de roca

Cristalografía

Cristalógrafo

Cromita

Cruz de hadas

Cuarzo

Cuarzo ahumado

Cuarzo alfa

Cuarzo beta

Cuarzo morrión

Cuaternario

Cubo

Cullinam

D

Dakota del Sur

Dauphiné

Diamante

Diploedro

Diploedro negativo

Diploedro positivo

Dodecaedro deltoidal

Dodecaedro rómbico

Domo

E

Enstatita

Epidota

Equilátero

Escalenoedro

Escalenoedro hexagonal

Esfalerita

Esfena

Esfenoide

Esmeralda

España

Espato de Islandia

Especularita

Espinela

Espodumena

Estados Unidos

Estaurilita

Estibina

Estilbita

Etta

Europa

Evaporita

F

Factor Jackson

Feldespato

Feldespato potásico

Fersman

Flogopita

Flúor

Fluorita

Fósforo

Franklin

Franklinita

Fulgurita

G

Gabriel Trujillo

Gabro

Galena

Geoda

Glaciar Tiefen

Goethita

Grafton

Granate

H

Halita

Harding

Hematita

Hermann Mauguin

Heulandita

Hexaedro

Hexaquisoetaedro

Hexaquistetraedro

Hornblenda

Huang

Hurlbut

I

India

J

Javier García Guinea

K

Klein

L

Lauegrama

Lechatelierita

Lepidolita

Limonita

Litio

Lupa

M

Madagascar

Magma

Magnesita

Magnetita

Maine

Malaquita

Manebach

Mar Rojo

Marcasita

Mattawan

Mediterráneo

Messiniense

Mica

Microclina

Microscopio

Milán

Miller

Mina Pulpi

Mineralogía

Molibdenita

Monario

Monacita

Montes Urales

Moscovita

Mullita

N

Nerón

New Hampshire
New Jersey
Noruega
Nubia

O

Octaedro
Oligoclase
Olivino
Ontario
Ópalo
Oregón
Oro
Oropimente
Ortoclase
Ortosa
Oxford

P

Pedión
Pegmatitas
Pelets
Perú
Pinacoide
Pinacoide basal
Pinacoide de cuarto orden
Pinacoide de primer orden
Pinacoide de segundo orden
Pinacoide de tercer orden
Pinacoide frontal
Pinacoide lateral
Pirita
Piritoedro
Piritoedro negativo
Piritoedro positivo

Pirofilita
Pirolusita
Piroxeno
Plagioclase
Plata
Polisintética de las plagioclases
Portugal
Prisma
Prisma de cuarto orden
Prisma de primer orden
Prisma de segundo orden
Prisma de tercer orden
Prisma dihexagonal
Prisma ditetragonal
Prisma ditrigonal
Prisma trigonal
Psilomelano

R

Rayos x
Rejalgar
René Hauy
Rocas ígneas
Rocas ígneas intrusivas
Rocas plutónicas
Rodocrosita
Rodonita
Rosa del desierto
Rubidio
Romboedro
Rutilo

S

Sal
Senario

Serpentina	Topacio
Siderita	Torio
Sienita nefelínica	Town Ship
Sílice	Trapezoedro
Sillimanita	Trapezoedro derecho
Silvina	Trapezoedro izquierdo
Sistema Cúbico	Travertino
Sistema hexagonal	Triaquisoctaedro
Sistema isométrico	Triaquistetraedro
Sistema monoclinico	Trifilita
Sistema rómbico	Triquitos
Sistema tetragonal	Turmalina
Sistema triclínico	Turquesa
Smithsonita	
Sodio	U
Sterling Hill	Uraninita
Sudamérica	Uranio
Suecia	Uruguay
Suiza	
Symex	
T	W
Talco	Wavellita
Tennantita	Willemita
Ternario	Wollastonita
Tetraedrita	Y
Tetraedro	Yeso
Tetraedro negativo	
Tetraedro positivo	Z
Tetraquishexaedro	
Titanio	Zafiro

Cristalografía Recreativa
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Facultad de Minas

Se terminaron de imprimir 100 ejemplares en marzo de 2011
en el Centro de Publicaciones

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Se utilizaron para su realización:

papel bond 75g en páginas interiores, carátula en propalcote 240g
la tipografía utilizada fue:

Goudy Old Style 11 puntos para el texto y

Goudy Old Style Bold 14 puntos para los títulos.

