



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra  
Proyecto PAPIME PE-102120

# Manual de identificación de minerales con modelos 3D y realidad aumentada



Luis Andrés Salinas Omassi  
Alfredo Victoria Morales  
Mayumy Amparo Cabrera Ramírez

## AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (**DGAPA**) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por facilitar los recursos presupuestales para contar con el material que se incluye en este manual, a través del proyecto **PAPIME PE 102120** “DISEÑO DE MANUALES DE CAMPO Y DE LABORATORIO INCORPORANDO FOTOGRAMETRÍA, MODELADO 3D Y REALIDAD AUMENTADA EN LA WEB PARA LA ENSEÑANZA DE LA GEOLOGÍA GENERAL EN LAS INGENIERÍAS: GEOLÓGICA, GEOFÍSICA, MINAS Y METALURGIA, PETROLERA, CIVIL, GEOMÁTICA Y AMBIENTAL”.

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	4
<b>VISITA NUESTROS MODELOS 3D DE MINERALES</b> .....	6
<b>FICHAS DESCRIPTIVAS DE MINERALES</b> .....	10
<b>MANUAL DE IDENTIFICACIÓN DE MINERALES</b>	
<b>1 DEFINICIÓN DE MINERAL</b> .....	20
Cristalinidad .....	21
Estabilidad bajo condiciones ambientales .....	21
Sustancias extraterrestres .....	22
Sustancias antropogénicas .....	22
Sustancias antropogénicas modificadas por procesos geológicos .....	22
Sustancias biogénicas .....	23
¿Quién se encarga de validar y aceptar a una sustancia como un mineral? .....	23
<b>2 CLASIFICACIÓN DE MINERALES</b> .....	23
<b>3 GRUPOS MINERALES</b> .....	25
3.1 <i>Silicatos</i> .....	25
3.1.1 Nesosilicatos .....	26
3.1.2 Sorosilicatos .....	26
3.1.3 Ciclosilicatos .....	27
3.1.4 Inosilicatos .....	27
3.1.4 Filosilicatos .....	28
3.1.5 Tectosilicatos .....	28
3.2 <i>Grupos Minerales No silicatos</i> .....	29
3.2.1 Elementos nativos .....	29
3.2.2 Sulfuros .....	29
3.2.3 Óxidos .....	30
3.2.4 Haluros .....	30
3.2.5 Carbonatos .....	31
3.2.6 Sulfatos .....	31
3.2.7 Fosfatos .....	32
3.2.8 Compuestos orgánicos y minerales orgánicos .....	32
3.2.4 Haluros .....	7
<b>4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES</b> .....	33
4.1 Estructura interna de los cristales .....	33
4.1.1 Las redes de Bravais .....	34
4.1.2 La cristalografía y los Rayos X .....	36
4.2 Lustre o brillo .....	37
4.2.1 Lustre metálico .....	37
4.2.2 Lustre no metálico .....	37
4.3 Color .....	39
4.3.1 Minerales idiocromáticos .....	39
4.3.2 Minerales alocromáticos .....	40
4.3.3 Minerales pseudocromáticos (efectos de color debidos a fenómenos ópticos) .....	41

4.5 Raya .....	42
4.6 Dureza .....	43
4.6.1 Escala de dureza de Mohs.....	43
4.6.2 Escala de dureza de Rosiwal .....	43
4.6.3 Escala de dureza de Vickers .....	45
4.7 Exfoliación o crucero .....	45
4.8 Fractura .....	47
4.9 Hábito cristalino .....	48
4.9.1 Cuando un mineral consta de cristales aislados y distintos .....	48
4.9.2 Cuando un mineral consta de un grupo de cristales distintos .....	49
4.9.3 Cuando un mineral consta de grupos de individuos radiales o paralelos .....	49
4.9.4 Cuando un mineral está formado por escamas o laminillas .....	51
4.9.5 Otros tipos de hábitos cristalinos .....	51
4.10 Diafanidad .....	53
4.11 Tenacidad .....	53
4.12 Magnetismo .....	54
4.13 Sabor y olor .....	54
4.14 Radiactividad .....	55
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>29</b>





*DANBURITA Y ESFALERITA, espécimen perteneciente a la colección de minerales de la Facultad de Ingeniería, UNAM*

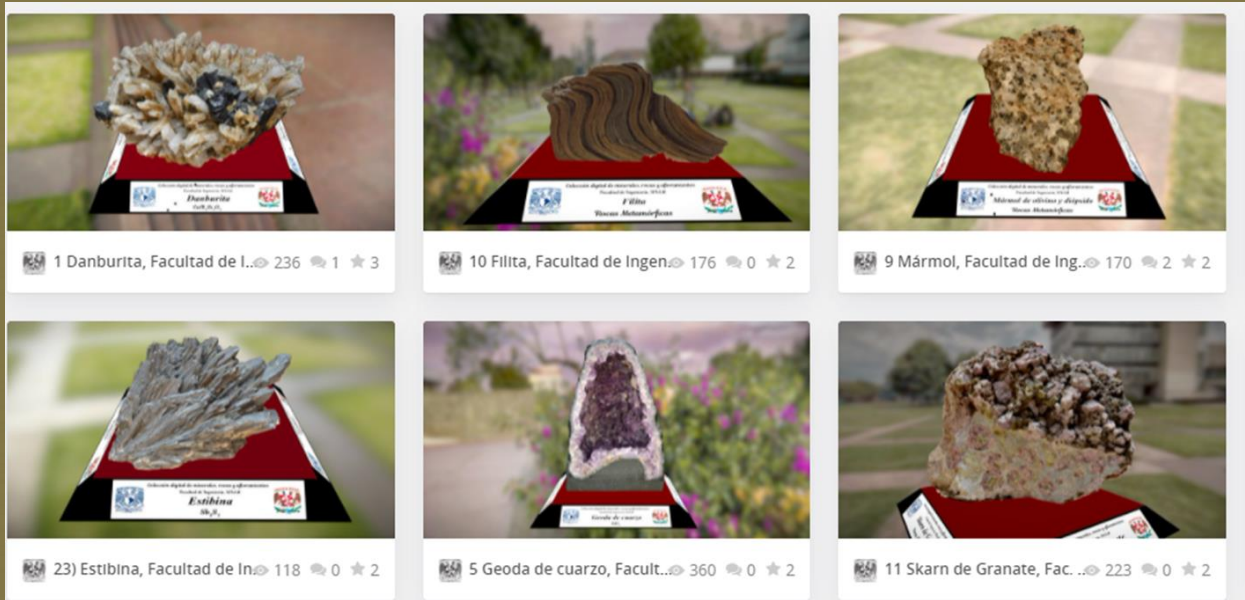
# INTRODUCCIÓN

Este manual de minerales fue pensado como una herramienta de apoyo para la enseñanza de los materiales sólidos de origen natural que componen nuestro planeta, incorporando el uso de nuevas tecnologías como Realidad Aumentada a partir de modelos tridimensionales fotorrealistas. Con este manual se ofrece a los estudiantes y profesores la posibilidad de observar y estudiar de forma remota y virtual algunas muestras de los diferentes tipos de minerales con que cuentan las colecciones de los laboratorios de Petrología y Mineralogía ubicados en los salones C-302 y C-303 de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y algunos otros que integran colecciones particulares de los profesores participantes en el proyecto, entre las que se encuentran la del Ing. Alfredo Victoria Morales.

Este manual puede aprovecharse para desarrollar cursos a distancia, que actualmente se imparten en la Facultad de Ingeniería, UNAM, de igual forma busca dar la oportunidad a todos los alumnos que estudian carreras relacionadas con Ciencias de la Tierra y carreras afines, poder tener acceso a muestras de mano de minerales a partir de modelos tridimensionales; tiene el propósito de ser un medio de apoyo al impartir clase por parte de los profesores y al mismo tiempo ser atractivo y útil al momento de estudiar de forma remota y autodidacta.

Los modelos de minerales de este manual cuentan con una ficha descriptiva que contiene información para su clasificación y estudio. Cada ficha descriptiva incluida contiene la puerta de acceso al modelo 3D, ya sea escaneando el código QR incorporado en cada ficha o por medio de la aplicación ARGeo que se puede descargar de la página <https://www.ingeniería.unam.mx/geologia3D> estos modelos fotorrealistas cuentan con la opción de ser visualizados mediante Realidad Aumentada.

Con el apoyo de este trabajo el lector podrá observar mediante modelos 3D algunas especies minerales.



*Modelos 3D en la cuenta ingenieria\_geológica dentro de la plataforma sketchfab.com*

# VISITA NUESTROS MODELOS 3D

Los modelos 3D en los puedes visitar en los enlaces junto a cada imagen o dentro de la cuenta *ingenieria\_geológica* de la plataforma *www.sketchfab.com*



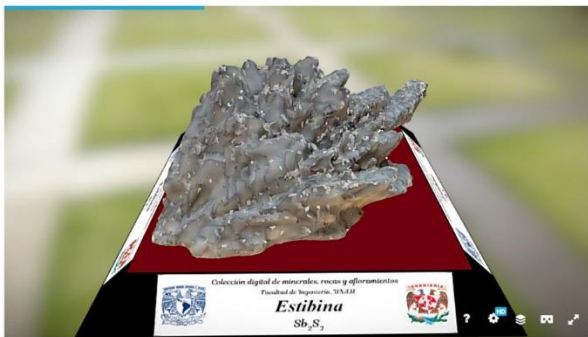
<https://sketchfab.com/3d-models/1-danburita-facultad-de-ingenieria-unam-c4a5b290fa8e4c4c8e49e5320b61a79f>

1 Danburita, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

736 3



<https://sketchfab.com/3d-models/23-estibina-facultad-de-ingenieria-unam-149b1a4a5b334ddcbc126b07989b3c6a>

23) Estibina, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

118 2



<https://sketchfab.com/3d-models/5-geoda-de-cuarzo-facultad-de-ingenieria-unam-6582850ace894e0ca237c4ecfac89ecb>

5 Geoda de cuarzo, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

360 2



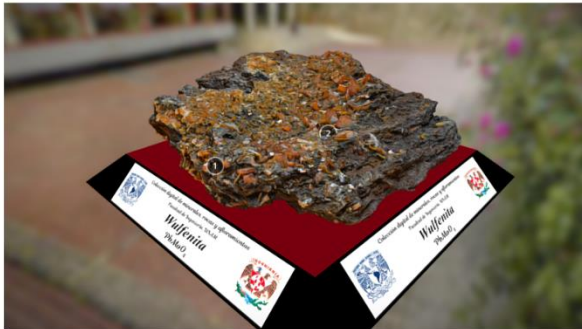
<https://sketchfab.com/3d-models/3-goethita-facultad-de-ingenieria-unam-e9ce6522143f49c78f07060f51c9fed4>

3 Goethita, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

746 1



<https://sketchfab.com/3d-models/4-wulfenita-facultad-de-ingenieria-unam-912fbb6079e4438bb229c85384b76934>

4 Wulfenita, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

86 1



<https://sketchfab.com/3d-models/24-granate-variedad-grosularia-fi-unam-7c57131e5952401d815686e58d7d4588>

24) Granate variedad Grosularia, FI, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

270 5





<https://sketchfab.com/3d-models/15-yeso-rosa-del-desierto-fi-unam-7a18528e1a664fc28972b291b8b6a4d6>

15 Yeso, rosa del desierto, FI, UNAM

3D Model

Ingenieria\_geologica PRO

233 2



<https://sketchfab.com/3d-models/2-magnetita-facultad-de-ingenieria-unam-fbc31f1fd23942ce90672aff6c4cc35c>

2 Magnetita, Facultad de Ingeniería, UNAM

3D Model



Ingenieria\_geologica PRO

532 1



# Fichas descriptivas de minerales

En el caso de los minerales, las fichas descriptivas son de color verde y cuentan con la siguiente información:

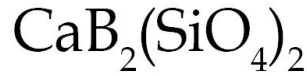
	<h2>Nombre del mineral</h2> <h2>Fórmula química</h2>	
<p><b>Clasificación</b> Nickel-Strunz 10th ed.</p> <p>Dana 8th ed.</p> <p><b>Propiedades Físicas</b></p> <p>Lustre</p> <p>Color</p> <p>Dureza (Mohs)</p> <p>Raya</p> <p>Fractura</p> <p>Hábito Cristalino</p> <p>Diafanidad</p> <p>Exfoliación</p> <p>Densidad</p> <p>Luminiscencia</p> <p>Magnetismo</p> <p>Radioactividad</p> <p>Código QR</p>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 20px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <p>Imagen del mineral / Disparador de modelos en 3D y AR</p> </div> <p><i>Localidad de donde proviene la muestra Colección a la que pertenece</i></p> <p>Descripcion macroscopica de la muestra: XX XX XX XX XX</p> <p>Etimologia: XX XX XX</p> <p>Ambiente: XX XX XX XX XX</p> <p>Usos: XX XX XX XX</p> <p>Principales localidades: XX XX XX XX</p>	<p><b>Propiedades Químicas</b></p> <p>Peso Molecular</p> <p>Composición Química elemental</p> <p>Composición Química óxidos</p> <p><b>Propiedades Cristalográficas</b></p> <p>Dimensión de celda</p> <p>Sistema Cristalino</p> <p>Difracción de rayos X por intensidad (I/I<sub>0</sub>)</p> <p><b>Propiedades Ópticas</b></p> <p>Información Óptica Isotropía o anisotropía, birrefringencia, relieve, reflexiones internas, pleocroísmo, ángulo 2V</p> <p><b>Fuentes de consulta</b></p>

Información que contiene la ficha descriptiva de minerales.





# Danburita y esfalerita



Mina Charcas, San Luis Potosí, México  
Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

<b>Clasificación</b>
Nickel-Strunz 10th ed. 09.FA.65 Silicatos (Germanatos)
Dana 8th ed. 56.03.01.01 Sorosilicato
<b>Propiedades Físicas</b>
Lustre vítreo a graso
Color incoloro, blanco, gris
Dureza (Mohs) 7.0 a 7.5
Raya Blanca
Fractura Subconcoidea a irregular
Hábito Cristalino Agregados de cristales prismáticos euhedrales
Diafanidad Transparente a translúcido
Exfoliación {001} Pobre
Densidad 2.97 - 3.02 g/cm <sup>3</sup>
Luminiscencia Rojo con luz fluorescente y termoluminiscente violeta-azul con luz UV de onda corta azul-verdoso con luz UV de onda larga



**Descripción macroscópica:** Esta muestra presenta cristales de danburita de color blanco, sin embargo, algunos cristales se observan ligeramente amarillentos, también presenta cristales de esfalerita, color gris oscuro. Los cristales de danburita tienen brillo vítreo, son translúcidos y tienen un hábito en forma de agregados de cristales prismáticos, euhedrales, de aproximadamente 5 cm de largo. En algunos cristales es posible apreciar una textura sacarosa sobre su superficie, que se asemeja al polvo, producto de alteración.

**Etimología:** Su nombre se debe al lugar de donde se extrajeron los primeros ejemplares en estudiarse: Danbury, Fairfield County - Connecticut, EUU., por el mineralogista Charles Upham Shepard en 1839.

**Ambiente:** En el yacimiento de Charcas, la danburita se encuentra en los cuerpos de reemplazamiento metasomático, asociada principalmente a datolita  $\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$ , cuarzo, calcita, apofilita, pirita, arsenopirita, esfalerita, galena, calcopirita, cinabrio y estibina. Esta danburita se formó durante una etapa retrógada del skarn por actividad de soluciones hidrotermales.

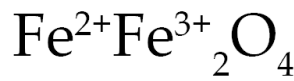
**Usos:** Los cristales de danburita son similares a los de topacio, aunque tienen menor densidad y son apropiados para la talla de gemas debido a su claridad, resistencia y dispersión de la luz. Este mineral en el ámbito de la gemología es relativamente raro debido a que las localidades con cristales de buena calidad son muy escasas.

**Principales localidades:** En México, se ha descrito en dos localidades de Baja California, La Mina Verde (Ensenada) y la Mina Chuqui (Tecate). Aunque la localidad más importante se encuentra en Charcas (San Luis Potosí). Los cristales de danburita encontrados en esta localidad presentan mayor tamaño y perfección.

<b>Propiedades Químicas</b>
Peso Molecular 245.86 gm
Composición Química elemental Calcio: 16.30% Silicio: 22.85% Boro: 8.79% Oxígeno: 52.06%
Composición Química óxidos CaO: 22.81% SiO <sub>2</sub> : 48.88% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 28.32%
<b>Propiedades Cristalográficas</b>
Dimensión de celda a = 8.048, b = 8.763, c = 7.731, Z = 4; V = 545.23 Den(Calc) = 3.00
Sistema Cristalino Ortorrómico dipiramidal
Difracción de rayos X por intensidad (I/I <sub>0</sub> ) 3.564 (1) 2.654 (0.75) 2.961 (0.7)
<b>Propiedades Ópticas</b>
Información Óptica Biaxial (+/-) a = 1.63 b = 1.633 g = 1.636 birre = 0.0060 2V (calc) = 88 2V (medido) = 88-90 Dispersión rel. fuerte
<b>Fuentes de consulta</b>
<a href="http://webmineral.com/">http://webmineral.com/</a> <a href="https://www.mindat.org/">https://www.mindat.org/</a> Dana J. D., Hurlbut C. S., Klein C. (1982) Manual de mineralogía de Dana, 3ra edición, Reverte, 564 p. Cruz-Ocampo (2007), Las gemas de México, BSGM, Vol 59, p 9-18



# Magnetita



## Clasificación

Nickel-Strunz 10th ed.  
4.BB.05  
Óxidos (hidróxidos)

Dana 8th ed.  
7.2.2.3  
Óxidos múltiples

## Propiedades Físicas

Lustre  
Metálico, sub metálico

Color  
Gris acerado a negro hierro

Dureza (Mohs)  
5.5 a 6.5

Raya  
Negra

Fractura  
Irregular o subconcoidea

Hábito Cristalino  
agregados de cristales octaédricos, raramente dodecaédricos. Masivo, granular

Diafanidad  
Opaco

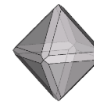
Exfoliación  
{111} Muy buena

Densidad  
5.175 g/cm<sup>3</sup>

Luminiscencia  
No fluorescente

Magnetismo  
Naturalmente fuerte

Radioactividad  
No radioactiva



*Cerro de Mercado, Durango, México  
Colección Facultad de Ingeniería, UNAM*

**Descripción macroscópica:** Esta muestra presenta cristales euhedrales de magnetita, de color gris oscuro, brillo metálico, de aproximadamente 3 cm de largo, son opacos y su hábito se muestra como un agregado de cristales octaédricos. Es posible observar un poco de oxidación (hematita) en la superficie de algunos cristales, dándoles un color rojizo.

**Etimología:** La magnetita es un mineral que se conoce desde tiempos remotos, probablemente debe su nombre a la ciudad de Magnesia de Tesalia, Grecia. La fábula de Plinio el Viejo (23 a 79 a.C.) "Magnes el pastor griego", relata como un pastor de ovejas encuentra una roca en donde los clavos de su calzado, se quedan adheridos por una fuerza extraña. El pastor llevó al pueblo algunos trozos de piedra. Al principio les dieron el nombre de "piedras mágicas" pero con el tiempo pasaron a denominarse las "piedras de Magnes" y de ahí el nombre de magnetita.

**Ambiente:** Es un mineral que se presenta como accesorio en rocas ígneas y metamórficas. Puede ser producido biogénicamente por algunos organismos como las bacterias magnetotácticas.

**Usos:** Junto con la hematita es una de las menas más importantes de hierro, ya que contiene un 72% de este elemento, es el mineral con mayor contenido en hierro. También se usa en construcción como añadido natural de alta densidad en hormigones, especialmente para protección radiológica. Otra aplicación es en calderas industriales, dado que la magnetita es un compuesto muy estable a altas temperaturas.

**Principales localidades:** Son numerosos los yacimientos de este mineral. Cabe destacar los existentes en Suecia, concretamente Falun (Provincia de Dalarna). En México los principales estados productores de magnetita en orden de importancia son: Michoacán, Coahuila, Colima, Jalisco, Sonora, Durango y Chihuahua.

## Propiedades Químicas

Peso Molecular  
231.54 gm

Composición Química elemental  
Hierro: 72.36%  
Oxígeno: 27.64%

Composición Química óxidos  
FeO: 31.03%  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 68.97%

## Propiedades Cristalográficas

Dimensión de celda  
a=8.391, Z=8, V=590.8  
Den (Calc)=5.21

Sistema Cristalino  
Isométrico

Difracción de rayos X por intensidad (I/I<sub>0</sub>)  
2.53 (1)  
1.483 (0.85)  
1.614 (0.85)

## Propiedades Ópticas

Información Óptica  
Isotrópico, por lo que no presenta birrefringencia, relieve muy alto, no presenta reflexiones internas, sin pleocroísmo. Se observa de color gris marrón con luz reflejada

## Fuentes de consulta

### Datos:

<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>  
Dana J. D., Hurlbut C. S., Klein C. (1982)

Manual de mineralogía de Dana, 3ra edición, Reverte, 564 p.  
Servicio Geológico Mexicano  
<https://www.gob.mx/sgm>





# Goethita

$$\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$$


## Clasificación

Nickel-Strunz 10th ed.  
4.FD.10  
Óxidos (hidróxidos)

Dana 8th ed.  
6.01.01.02  
Óxidos múltiples

## Propiedades Físicas

Lustre  
Adamantino, metálico,  
sedoso, mate

Color  
marrón, rojizo,  
amarillento

Dureza (Mohs)  
5 a 5.5

Raya  
marrón amarillenta,  
anaranjada o amarillo  
ocre

Fractura  
Irregular

Hábito Cristalino  
acicular, radial,  
reniforme, masivo

Diafanidad  
Opaco

Exfoliación  
{010} perfecta  
{100} Muy buena

Densidad  
3.8 g/cm<sup>3</sup>

Luminiscencia  
No fluorescente

Magnetismo  
fuerte

Radioactividad  
No radioactiva



Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

**Descripción macroscópica:** Esta muestra presenta microcristales de goethita con un crecimiento estalactítico de aproximadamente 3 cm de largo, en su extremo se observan redondeados, parecido a un hábito botroidal. En su superficie, predominan colores rojizos, debido a la presencia de óxidos de hierro; al fresco presenta color gris oscuro. Tiene brillo metálico a submetálico y es opaca.

**Etimología:** Fue nombrada en honor al poeta, novelista, filósofo y geocientífico alemán Johan Wolfgang von Goethe (1749-1832).

**Ambiente:** Es un producto de meteorización común de numerosos minerales de hierro en ambientes oxigenados. Se han encontrado grandes cantidades de goethita como mantos lateríticos residuales, resultantes de la meteorización de la serpentina. También se hallan depósitos de goethita en las calizas que contienen hierro. El hierro de la caliza puede ser gradualmente disuelto por el agua y en condiciones favorables puede, como goethita, reemplazar al carbonato cálcico de la roca. Aparece también como precipitado primario en ambientes hidrotermales y pantanosos después de la oxidación de aguas que contengan Fe<sup>2+</sup>. Puede aparecer asociada a lepidocrocita, hematita, pirita, siderita, pirolusita y manganosita.

**Usos:** El principal uso de la goethita es como mena de hierro. En algunos casos este mineral puede servir para pigmentar arcilla. Los especímenes finos o de colección son raros, por lo que son valorados por coleccionistas. Las variedades iridiscentes o con bandas se cortan y pulen en cabujones para la fabricación de joyas.

**Principales localidades:** Es un mineral muy extendido, algunos de los depósitos más importantes están en Siegen, Alemania; así como en el distrito checo de Příbram. En México se han encontrado cristales muy bellos de pseudomorfos de goethita en Santa Eulalia, Chihuahua.

## Propiedades Químicas

Peso Molecular  
88.85 gm

Composición Química elemental  
Hierro: 62.85%  
Oxígeno: 36.01%  
Hidrógeno: 1.13%

Composición Química óxidos  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 89.86%  
H<sub>2</sub>O: 10.14%

## Propiedades Cristalográficas

Dimensión de celda  
a=4.596, b=9.957,  
c=3.021, Z=4, V=138.25

Sistema Cristalino  
Ortorómbico  
dipiramidal

Difracción de rayos X  
por intensidad (I/I<sub>0</sub>)  
4.18 (1)  
2.69 (0.85)  
2.452 (0.85)

## Propiedades Ópticas

Biaxial (-)  
a = 2.26 - 2.275  
b = 2.393 - 2.409  
g = 2.398 - 0.24  
2V = 20 - 78  
Dispersión r > v  
Con luz reflejada se observa color gris azulado con reflexiones internas en colores amarillentos y rojizos

## Fuentes de consulta

<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>  
Dana J. D., Hurlbut C. S.,  
Klein C. (1982)  
Manual de mineralogía de Dana,  
3ra edición, Reverte, 564 p.  
Ramdohr, P. (1980)  
The ore minerals and their  
intergrowths. (4th edition).



# Wulfenita

$PbMoO_4$



## Clasificación

Nickel-Strunz 10th ed.  
7.GA.05  
Sulfatos

Dana 8th ed.  
48.1.3.1  
Molibdatos y  
Tungstos anhidros

## Propiedades Físicas

**Lustre**  
Adamantino,  
sub-adamantino,  
resinoso

**Color**  
amarillo - anaranjado,  
miel, rojizo

**Dureza (Mohs)**  
2.5 - 3

**Raya**  
blanca

**Fractura**  
Irregular, subconcooidal

**Hábito Cristalino**  
tabular, piramidal

**Diafanidad**  
Transparente,  
translúcido

**Exfoliación**  
buena en {011}

**Densidad**  
6.5 a 7.5 g/cm<sup>3</sup>

**Luminiscencia**  
fluorescente  
amarillo con onda  
UV corta  
rojizo con onda UV  
larga

**Magnetismo**  
no magnética

**Radioactividad**  
No radioactiva



Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

**Descripción macroscópica:** En esta muestra pueden observarse cristales de hábito prismático - tabular, de color rojizo, menores a dos centímetros de largo, con brillo vítreo y ligeramente transparentes. Estos cristales crecen como grupos de cristales distintos.

**Etimología:** Fue descrita por primera vez en 1845 por una ocurrencia en Bad Bleiberg, Carinthia, Austria. Fue nombrado por Wilhelm Karl von Haidinger en honor a Franz Xavier von Wulfen (1728-1805), un mineralogista austriaco.

**Ambiente:** Es un mineral secundario y escaso que se encuentra en forma de cristales finos tabulares de un brillante color rojo-naranja o naranja-amarillo, apareciendo junto a yacimientos de plomo en las zonas de oxidación hidrotermal. Normalmente se puede encontrar en las zonas de oxidación de los filones de plomo, junto a otros minerales secundarios, especialmente: vanadinita y piromorfita, aunque también puede estar asociado con smithsonita, mimetita, limonita, hemimorfita, fluorita, cerusita o anglesita.

**Usos:** La wulfenita es un mineral muy popular y muy solicitado por los coleccionistas. Se utiliza como un mineral menor de plomo y molibdeno.

**Principales localidades:** Este mineral es poco común, aparece como mineral secundario en yacimientos de plomo de las zonas de oxidación hidrotermal. Existen varias localidades mundiales excepcionales para este mineral. La localidad tipo de wulfenita, conocida por producir cristales delgados de forma octagonal anaranjados, es Bleiberg, Carintia, Austria. En México la mayor parte de los especímenes de wulfenita para colección, provienen de la mina Ojuela, Mapimi, Durango, de donde se extrae plata, plomo y zinc.

## Propiedades Químicas

**Peso Molecular**  
367.14 gm

## Composición Química elemental

Molibdeno: 26.13%  
Plomo: 56.44%  
Oxígeno: 17.43%

## Composición Química óxidos

MoO<sub>3</sub>: 39.21%  
PbO<sub>2</sub>: 65.15%

## Propiedades Cristalográficas

**Dimensión de celda**  
a:c = 1:2.22815  
a=5.435, c=12.11, Z=4,  
V=357.72

**Sistema Cristalino**  
Tetragonal

## Difracción de rayos X por intensidad (I/I<sub>0</sub>)

3.24 (1)  
2.021(0.3)  
1.653(0.25)

## Propiedades Ópticas

Uniaxial (-)  
e = 2.304  
w = 2.402  
2V = 8°

birrefringencia = 0.122  
Pleocroísmo = débil

## Fuentes de consulta

<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>  
Dana J. D., Hurlbut C. S.,  
Klein C. (1982)

Manual de mineralogía de Dana,  
3ra edición, Reverte, 564 p.  
Rivera Carranza, E. (2014)  
Yacimientos Minerales en el  
Estado de Durango, SGM.





# Geoda de cuarzo

## SiO<sub>2</sub>



**Clasificación**  
 Nickel-Strunz 10th ed.  
 4.DA.05  
 Oxidos  
 Dana 8th ed.  
 75.01.03.01  
 Tectosilicatos con 4 Si  
 coordinados

**Propiedades Físicas**

Lustre  
 vítreo  
 Color y variedades  
 incoloro, marrón (morión),  
 violeta (amatista), rosa  
 (rosado), rojo (jacinto de  
 compostela), verde (prasio),  
 azul (zafiro), gris (alhumado),  
 amarillo - anaranjado

Dureza (Mohs)  
 7

Raya  
 blanca

Fractura  
 conchoidal

Hábito Cristalino  
 prismático piramidal

Diafanidad  
 Transparente

Exfoliación  
 Pobre a Indistinta

Densidad  
 2.62 g/cm<sup>3</sup>

Luminiscencia  
 Fluorescente y  
 triboluminiscente, bajo  
 UV corta: amarillo  
 anaranjado  
 bajo UV larga: amarillo  
 anaranjado

Magnetismo  
 No magnética

Radiactividad  
 No radiactiva



**Descripción macroscópica:** Esta muestra es una geoda rellena con cristales de cuarzo, variedad amatista, debido al color lila o morado que presentan sus cristales. Los cristales miden aproximadamente 1 cm, su forma es prismática, piramidal, el hábito que presentan es en drusa, cubriendo completamente la superficie interna de la geoda. Poseen brillo vítreo, son translúcidos a transparentes.

**Etimología:** La palabra geoda proviene del griego, significa con aspecto parecido a la Tierra. El cuarzo, es un mineral que se conoce desde tiempos prehistóricos, el nombre más antiguo del que se tiene registro fue "kristallos" por Teofrastus, en Grecia 300 a.C.

El actual nombre cuarzo, proviene del alemán "quarz" y su primer registro como tal fue en 1530 en los escritos de Georgius Agricola.

**Ambiente:** Las geodas pueden formarse en cualquier tipo de roca o mineral, pueden ser de dimensiones variables, desde apenas unos centímetros, hasta varios metros de largo. Por ejemplo, pueden formarse a partir de vesículas en las rocas magmáticas durante su enfriamiento, como en los basaltos, o incluso, en grandes cavidades o galerías dentro formaciones sedimentarias. Los fluidos hidrotermales, o las aguas meteóricas pueden contener silicatos y/o carbonatos en solución; al percolar la roca, estos minerales se depositan sobre la superficie interior de la cavidad. Con el tiempo, y si los fluidos con los elementos o compuestos en solución continúan circulando, los cristales de minerales crecen, ocupando el espacio vacío, hacia el centro de la cavidad.

**Usos:** No tienen un uso específico, sin embargo, la belleza de sus cristales, las vuelven atractivas para coleccionistas o como objeto decorativo. Los cristales de cuarzo amatista pueden ser usados como gema.

**Principales localidades:** No existen localidades particulares para la formación de geodas, pero destacan algunos sitios por sus espectaculares cristales, como la mina de Naica, Chihuahua, México, Donde se presentan cristales de yeso de más de 10 m de largo y aproximadamente 1.2 m de diámetro.



Colección Ing. Alfredo Victoria Morales



**Propiedades Químicas**

Peso Molecular  
 60.08 gm

Composición Química elemental  
 Sílice: 46.74%  
 Oxígeno: 53.26%

Composición Química óxidos  
 SiO<sub>2</sub>: 100%

**Propiedades Cristalográficas**

Radio axial  
 a:c=1:1.10013

Dimensión de celda  
 a = 4.9133, c = 5.4053,  
 Z = 3; V = 113.00  
 Den(Calc)= 2.65

Sistema Cristalino  
 Trigonal-trapezohedral

Difracción de rayos X  
 por intensidad (I/I<sub>0</sub>)  
 3.342 (1)  
 4.257(0.22)  
 1.8179(0.14)

**Propiedades Ópticas**

Uniaxial (+)

Valores RI  
 n<sub>o</sub>=1.543 - 1.545  
 n<sub>e</sub>=1.552 - 1.554

Birrefringencia  
 0.009

Relieve superficial  
 bajo

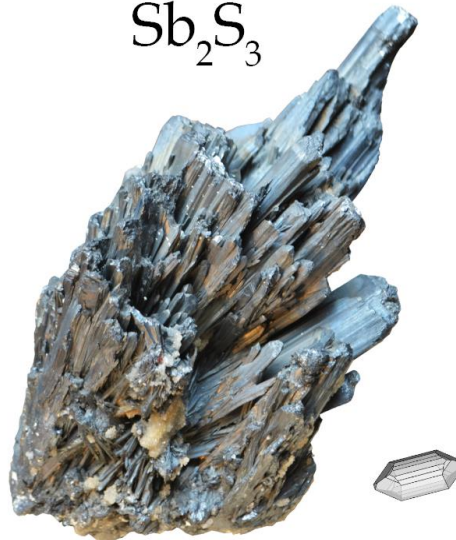
Dispersión  
 baja: 0.009

**Fuentes de consulta**

<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>  
 Dana J. D., Hurlbut C. S.,  
 Klein C. (1982)  
 Manual de mineralogía de Dana  
 3ra edición, Reverte, 564 p.  
 Shea, N. (2008).  
 Cavern of Crystal Giants.  
 National Geographic.



# Estibina



Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

## Clasificación

Nickel-Strunz 10th ed.  
2.DB.05  
Sulfuros y Sulfosales

Dana 8th ed.  
2.11.2.1  
Sulfuros

## Propiedades Físicas

Lustre  
Metálico

Color  
Gris plomo con tono azulado

Dureza (Mohs)  
2

Raya  
Gris plomo

Fractura  
Subconcoidea

Hábito Cristalino  
Columnar

Diafanidad  
Opaco

Exfoliación  
Perfecta en {010},  
imperfecta en  
{100}{110}

Densidad  
4.63 g/cm<sup>3</sup>

Luminiscencia  
No fluorescente

Magnetismo  
No magnético

Radioactividad  
No radioactiva



## Propiedades Químicas

Peso Molecular  
339.70 gm

Composición Química elemental  
Antimonio: 71.68%  
Azufre: 28.32%

## Propiedades Cristalográficas

Dimensión de celda  
a=11.229, b=11.31,  
c=3.893, Z=4, V=494.41  
Den (Calc)=4.56

Sistema Cristalino  
Ortorrómico -  
Dipiramidal

Difracción de rayos X  
por intensidad (I/I<sub>0</sub>)  
2.764 (1)  
3.053 (0.95)  
3.556 (0.7)

## Propiedades Ópticas

Información Óptica  
Fuerte anisotropía

Color con luz reflejada  
blanco

## Fuentes de consulta

<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>  
Dana J. D., Hurlbut C. S.,  
Klein C. (1982)  
Manual de mineralogía de Dana,  
3ra edición. Reverte, 564 p.

**Descripción macroscópica:** Esta muestra de estibina presenta cristales alargados, de forma tabular, agrupados formando columnas. Se observan de diferentes tamaños, desde uno o dos centímetros, hasta 12 cm. Son de color gris plomo, con brillo metálico y opacos.

**Etimología:** Del griego Stimmi o stibi, "antimonio", de ahí al latín stibium.

**Ambiente:** La estibina, estibinita o antimonita es la mena principal de antimonio. Se asocia con otros sulfuros en yacimientos hidrotermales. Se halla en filones o capas de cuarzo en granitos y gneis. Puede aparecer como reemplazamiento en calizas y pizarras y debe probablemente su origen a depósitos hidrotermales. Frecuentemente asociado con otros minerales de antimonio, como productos de su alteración, y con galena, cinabrio, blenda, baritina, rejalgar, oropimente y oro.

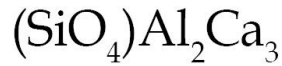
**Usos:** La estibina se ha utilizado tradicionalmente para la fabricación del kohl, cosmético ampliamente utilizado en Oriente Medio y Arabia. Es apreciada por coleccionistas ya que forma cristales muy bellos.

**Principales localidades:** La mayor parte de la producción anual proviene de la provincia de Hunán en China. Otro yacimiento destacable por los bellos ejemplares de cristales de hasta 60 cm de largo, pero que actualmente está agotado, se encuentra en la Isla de Shikoku, Japón. En América del Sur hay localidades importantes en Bolivia y en Perú. En México, una localidad destacable se encuentra en San Martín, Zacatecas.





# Granate (Grosularia)



**Clasificación**  
 Nickel-Strunz 10th ed.  
 9.AD.25  
 Silicatos (germanatos)  
 Dana 8th ed.  
 51.4.3b.2  
 Nesosilicatos

**Propiedades Físicas**  
 Lustre  
 Vítreo a sub-vítreo  
 Color  
 Pardo claro, ligeramente verdoso  
 Dureza (Mohs)  
 6.5 - 7  
 Raya  
 Blanca a blanca parduzca  
 Fractura  
 Irregular o subconcoidea  
 Hábito Cristalino  
 Cristales ehuedrales bien formados, granular  
 Diafanidad  
 Ligeramente translúcido  
 Exfoliación  
 raramente se observa en {110}  
 Densidad  
 3.594 g/cm<sup>3</sup>  
 Luminiscencia  
 Fluorescente, rosa con onda UV corta y anaranjada con onda UV larga  
 Radioactividad  
 No radioactiva



Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

**Descripción macroscópica:** En esta muestra se observan cristales de granate (grosularia) de grano grueso, el aspecto de los cristales es prismático, con caras bien definidas. El brillo es subvitreo y tienen baja diafanidad, presentan color pardo claro, ligeramente verdoso. Se encuentran asociados con calcita.

**Etimología:** La palabra Granate deriva del latín granatus, como un grano. Fue llamado grossularita por Werner en 1808, debido al parentesco con el color de las grosellas, además de la forma en que se presentan sus cristales similares a racimos de estos frutos.

**Generalidades:** La grosularia contiene muchas veces hierro ferroso reemplazando al calcio y hierro férrico, en lugar de aluminio. Puede presentarse color blanco, verde, amarillo, pardo canela y rojo pálido.

**Ambiente:** Los granates son un grupo de minerales muy extendidos; aparecen como constituyentes accesorios de rocas metamórficas y en ciertas ígneas. Su yacimiento más característico es en esquistos micáceos, esquistos de hornblenda y gneis. La grosularia normalmente se forma a partir de rocas calizas, o sedimentarias silíceas, sometidas a metamorfismo de contacto por la proximidad de una cámara magmática. También se puede formar por metamorfismo regional. Algunos minerales asociados son mica, clorita, diópsido, calcita y serpentinita.

**Usos:** Es un mineral que, de acuerdo con la pureza y color que presente, puede ser valorado como gema.

**Principales localidades:** Se han encontrado importantes yacimientos de grosularia en Asbestos (Canadá), México, Kenia, Italia y Sri Lanka. La variedad sosolita procede de Morelos y Chihuahua (México) y la variedad hesonita de Tanzania y Kenia.

**Propiedades Químicas**  
 Peso Molecular  
 450.45 gm

**Composición Química elemental**  
 Calcio: 26.69%  
 Aluminio: 11.98%  
 Silice: 18.71%  
 Oxígeno: 42.62%

**Composición Química óxidos**  
 CaO: 37.35%  
 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2.64%  
 SiO<sub>2</sub>: 40.02%

**Propiedades Cristalográficas**  
 Dimensión de celda  
 a=11.851, Z=8,  
 V=1664.43  
 Sistema Cristalino  
 Isométrico

**Difracción de rayos X por intensidad (I/I<sub>0</sub>)**  
 2.65 (1)  
 1.58 (0.9)  
 2.96 (0.8)

**Propiedades Ópticas**  
 Información Óptica  
 Isotrópico, por lo que no presenta birrefringencia, relieve alto, sin pleocroísmo.

**Fuentes de consulta**  
 Dana J. D., Hurlbut C. S., Klein C. (1982) Manual de mineralogía de Dana, 3ra edición. Reverte, 564 p.  
<http://webmineral.com/>  
<https://www.mindat.org/>





# Yeso, Rosa del desierto

$$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$


## Clasificación

Nickel-Strunz 10th ed.

7.CD.40

Sulfatos

Dana 8th ed.

29.6.3.1

Ácidos hidratados y sulfatos normales

## Propiedades Físicas

Lustre

Vítreo, Sub-vítreo, sedoso, perlado, mate

Color

Desde incoloro a blanco, frecuentemente rojizo debido a impurezas

Diafanidad

Transparente, translúcido, opaco

Dureza (Mohs)

2

Raya

Blanca

Fractura

Concoidal, astillosa

Exfoliación

Perfecta en {010}

Densidad

2.312 - 2.322 g/cm<sup>3</sup>

Luminiscencia

Fluorescente y fosforescente, tanto con UV corta como con UV larga, se observa anaranjada amarillenta

Magnetismo

No magnética



Colección Facultad de Ingeniería, UNAM

**Descripción macroscópica:** Esta muestra es una formación de yeso llamada "rosa del desierto". Sus cristales se observan de hábito prismático, tabulares a lenticulares, con brillo sedoso. Sus cristales se intersecan y crecen entre ellos. El color que presenta es pardo claro, amarillento.

**Etimología:** La rosa del desierto se forma en los desiertos, cuando se presentan las condiciones necesarias de capas alternadas de yeso, agua y arena. Forma cristales muy bellos que recuerdan la forma de una flor, de ahí la denominación de "rosa del desierto".

**Ambiente:** Se asocia la cristalización de rosas del desierto con ambientes fuertemente evaporíticos ricos en aguas sulfatadas. Esta agua se dispersa en el sedimento arenoso/lutítico, se evapora y precipita yeso en numerosos cristales que se intersecan y dan esta apariencia característica.

**Usos:** Por su composición rica en yeso, sería apto para ser usado en la construcción, pero dado su alto contenido de impurezas, así como de arena hace inviable este uso, por lo que su interés es plenamente ornamental y/o decorativa.

**Principales localidades:** Sus principales yacimientos se han registrado en Argelia (desierto del Sáhara), Túnez, España, en EE. UU. (Cochise, Arizona), en México en Ciudad Juárez, Chihuahua en el Desierto de Samalayuca y en Chile (Desierto de Atacama). Esta se encuentra en casi todas las zonas del planeta con clima desértico, con suelo arenoso y rico en yeso. Sin embargo, las que son consideradas más hermosas se encuentran en el desierto del Sahara.

## Propiedades Químicas

Peso Molecular  
172.17 gm

Composición Química elemental

Calcio: 23.28%

Hidrógeno: 2.34%

Azufre: 18.62%

Oxígeno: 55.76%

Composición Química óxidos

CaO: 32.57%

H<sub>2</sub>O: 20.93%

SO<sub>3</sub>: 46.50%

## Propiedades Cristalográficas

Dimensión de celda

a=5.68, b=15.18,

c=6.29, Z=4; beta=113.833°, V= 496.09

Sistema Cristalino  
Monoclínico

Difracción de rayos X por intensidad (I/I<sub>0</sub>)

7.63(1), 4.28(1),

3.07(0.8), 2.87(0.5),

2.69(0.4), 2.09(0.3),

2.22(0.2), 3.8(0.2).

## Propiedades Ópticas

Información Óptica

Biáxico (+)

a=1.519 - 1.521

b=1.522-1.523

g=1.529-1.53

2V: 58° a 68°

Relieve: Bajo

## Fuentes de consulta

Datos:

<http://webmineral.com/>

<https://www.mindat.org/>

Dana J. D., Hurlbut C. S.,

Klein C. (1982)

Manual de mineralogía de Dana, 3ra edición, Reverte, 564 p.



# **IDENTIFICACIÓN DE MINERALES**

# Manual de identificación de minerales

## 1 Definición de mineral

A través del tiempo, la definición de un mineral se ha ido modificando para adaptarse a los avances tecnológicos y científicos. En términos generales, un mineral es un elemento o compuesto químico normalmente *crystalino* que ha sido formado como resultado de procesos geológicos. Con esta breve definición se puede abarcar la gran mayoría de las sustancias aceptadas como un mineral, aunque, existen excepciones; algunas sustancias que no cumplen estrictamente estos requerimientos son consideradas minerales, por lo que en ocasiones la línea que divide a una sustancia de ser considerada un mineral o no, puede no estar muy bien definida. A continuación, de acuerdo con Nickel E., H. (1995) se explicarán los requerimientos que se tienen para que una sustancia pueda considerarse un mineral y qué criterios se han tomado para discernir a ciertas sustancias de ser, o no, un mineral.

### Cristalinidad

El término “cristalino”, significa que la sustancia posee un ordenamiento atómico a una escala que es capaz de producir un patrón de difracción “indexable” (por ejemplo, con los índices de Miller), cuando la sustancia es atravesada por una onda electromagnética con una longitud de onda apropiada, como por rayos X. Existen sustancias que ocurren de forma natural que no son cristalinas, dichas sustancias pueden ser divididas en dos grupos, *amorfas*, implica que esas sustancias nunca han sido cristalinas y *metamícticas* que son sustancias que alguna vez fueron cristalinas, pero perdieron su arreglo atómico debió a radiación ionizante emitida por átomos de la propia sustancia o cercanas.

La barrera que impide considerar estas sustancias como minerales es la dificultad para caracterizarlas desde el punto de vista químico, es decir, determinar si se trata de un verdadero compuesto químico o de una mezcla. De forma general estas sustancias reciben el nombre de *mineraloides*, sin embargo, existen sustancias amorfas que han sido aceptadas como minerales, por ejemplo, la georgita (grupo de los carbonatos) y la calciouranoita (grupo de los óxidos). Las sustancias metamícticas formadas durante procesos geológicos, pueden llegar a ser consideradas una especie mineral si se demuestra que la sustancia original, previo a la metamictización, poseía un arreglo cristalino y mantiene la misma composición química. Las evidencias que se requieren para demostrar que previamente era un mineral incluyen la restauración de la cristalinidad mediante un tratamiento térmico y que el patrón de difracción emitido coincida con la morfología externa (si la tuvo) del cristal original. Un ejemplo de este caso es la Fergusonita – Y (del grupo de los óxidos que contiene tierras raras). Un caso especial es cuando una sustancia de origen natural, no cristalina bajo condiciones ambientales, puede volverse cristalina cuando pasa a su fase sólida, por ejemplo, el agua en fase líquida no es considerada un mineral, sin embargo, en su fase sólida, como hielo, es considerada un mineral. Otro caso especial es del mercurio, que es considerado un mineral pese a que éste no ocurre de forma cristalina en nuestro planeta.

## **Estabilidad bajo condiciones ambientales**

Muchos minerales fueron formados bajo condiciones de alta temperatura y/o presión, y son metaestables bajo condiciones ambientales, otros tienden a deshidratarse cuando son removidos del lugar de donde se formaron originalmente. Para estudiar y lograr caracterizar estos minerales, se requiere el uso de tratamientos especiales que prevengan la pérdida de sus características físicas y químicas.

## **Sustancias extraterrestres**

Las sustancias extraterrestres, como meteoritos, rocas lunares, marcianas, etc., fueron aparentemente producidas por procesos similares a los que ocurren en la Tierra, por lo tanto, estos procesos son ahora llamados geológicos, aunque originalmente “geología” implicaba el estudio de las rocas de este planeta. En consecuencia, los componentes naturales de las rocas y polvo extraterrestre son considerados minerales.

## **Sustancias antropogénicas**

Las sustancias antropogénicas son aquellas producidas por el hombre, y no son consideradas como minerales. Si estas sustancias hechas por el hombre presentan las mismas características y propiedades que las que posee algún mineral, entonces se puede decir que se trata de un equivalente sintético del mineral en cuestión, como por ejemplo con los diamantes sintéticos, en donde no participa ningún evento geológico en su génesis, sin embargo, cuenta con una estructura cristalina idéntica a la de un diamante natural.

## **Sustancias antropogénicas modificadas por procesos geológicos**

Existen compuestos químicos de origen antropogénico que han sido afectados por procesos geológicos, que en ocasiones han sido aceptados como minerales, por ejemplo, algunos minerales de las minas de Laurión, en Grecia. Estos minerales fueron formados, por la reacción del agua del mar con los residuos mineros de la explotación de menas de plomo y plata. Sin embargo, actualmente, existen tantos compuestos químicos antropogénicos en casi todos los ambientes, que la CNMMN ha estipulado que, nuevas sustancias antropogénicas encontradas, que hayan sufrido cambios debido a procesos geológicos, ya no serán consideradas un mineral. Solo se podrán considerar nuevos minerales cuando estos deriven de procesos geológicos que afectaron a rocas que hayan sido expuestas por la actividad humana, por ejemplo, por minería, o durante la construcción de una obra de ingeniería, siempre y cuando esta exposición de rocas no haya sido planificada con el propósito de alterarla para generar nuevos minerales. Otro caso particular es el de los incendios dentro de las minas, que en ocasiones pueden llegar a formar compuestos químicos, pero, ya que no es claro el punto en donde la intervención humana comienza al iniciar el incendio, estas sustancias no son consideradas como minerales.

## **Sustancias biogénicas**

Las sustancias biogénicas son compuestos químicos producidas completamente por procesos biológicos sin haber sido afectadas por algún proceso geológico, por ejemplo, las conchas de moluscos, los cálculos renales o los cristales de oxalatos en los tejidos de algunas plantas. Ya que estas sustancias no fueron modificadas por procesos geológicos, no son aceptadas como minerales. Sin embargo, si existieron procesos geológicos involucrados en la génesis del compuesto, pueden ser considerados minerales; Algunos ejemplos de minerales aceptables de este tipo son sustancias cristalizadas que derivan de materia orgánica atrapada en lutitas negras o del guano en grutas y cuevas, de la misma forma, los constituyentes de calizas y fosforitas que provienen de organismos marinos.

### **¿Quién se encarga de validar y aceptar a una sustancia como un mineral?**

Actualmente quien determina si una sustancia cumple con los requisitos para ser considerada un mineral, es la Comisión de Nuevos Minerales y Nombres de Minerales (CNMMN), por sus siglas del inglés Commission on New Minerals and Mineral Names, de la Asociación Mineralógica Internacional (IMA) por sus siglas en inglés International Mineralogical Association. Es una organización internacional fundada en 1958, cuyo objetivo es promover la cooperación internacional en las ciencias mineralógicas. Actualmente, para el año 2021, existen aproximadamente 5,700 especies minerales conocidas y aprobadas por la CNMMN de la IMA

## **2 Clasificación de minerales**

En la antigüedad los minerales se solían clasificar con criterios basados en su aspecto físico; Teofrasto, en el siglo III a.C., creó la primera lista sistemática cualitativa conocida; Plinio el Viejo (siglo I) en su “Historia Natural”, realizó una sistemática mineral, trabajo que, en la Edad Media sirvió de base a Avicena; posteriormente Linneo (1707-1778) intentó idear una nomenclatura fundándose en los conceptos de género y especie, pero no tuvo éxito y dejó de usarse en el siglo XIX; con el posterior desarrollo de la química, el químico sueco Axel Fredrik Cronstedt (1722-1765) elaboró la primera clasificación de minerales en función de su composición.

Para 1837 el geólogo estadounidense James Dwight Dana publicó por primera vez su System of Mineralogy en donde propone una clasificación mineralógica considerando la estructura y composición química que junto con la de Strunz son las más utilizadas en la actualidad. La clasificación de Dana asigna un número de cuatro partes a una especie mineral. Su número de clase se basa en los grupos de composición importantes; el número de tipo da la relación de cationes/aniones en el mineral; y los dos últimos números corresponden al grupo de minerales por similitud estructural dentro de un tipo o clase determinada. La clasificación de Strunz, llamada así por el mineralogista alemán Karl Hugo Strunz, se basa en el sistema de Dana, pero combina tanto criterios químicos como estructurales, estos últimos con respecto a la distribución de los enlaces químicos.

Desde mitad del siglo XIX, los minerales han sido sistemáticamente agrupados en diferentes clases con base en su composición química. Por lo general, dichos grupos se clasifican considerando al anión dominante o anión complejo presente en la composición química. Actualmente los minerales se clasifican (en orden creciente de generalidad) según la especie, que en ocasiones puede formar series con otros minerales, y por grupos minerales que comparten algunas características físicas y químicas.

Una **especie mineral**, se distingue una de otra por sus propiedades químicas y físicas específicas y únicas. Puede haber más de dos minerales que compartan la misma fórmula química, pero si tienen una estructura cristalina diferente, entonces se considerará otra especie. Por ejemplo, el grafito y el diamante, ambos están formados por C, sin embargo, en el grafito los átomos de carbono se ordenan en forma de láminas, que se unen unas con otras mediante enlaces débiles, lo que origina planos de exfoliación o ruptura preferencial. En los diamantes, todos los átomos de C, se unen unos con otros átomos de C mediante enlaces fuertes (covalentes), en una estructura tridimensional compacta, lo que lo vuelve un mineral muy duro puesto que no presenta planos de exfoliación.

Una **variedad mineral** es un tipo específico de especie mineral que difiere por alguna característica física, como el color o el hábito cristalino. Un ejemplo es la amatista, que es una variedad color púrpura del cuarzo.

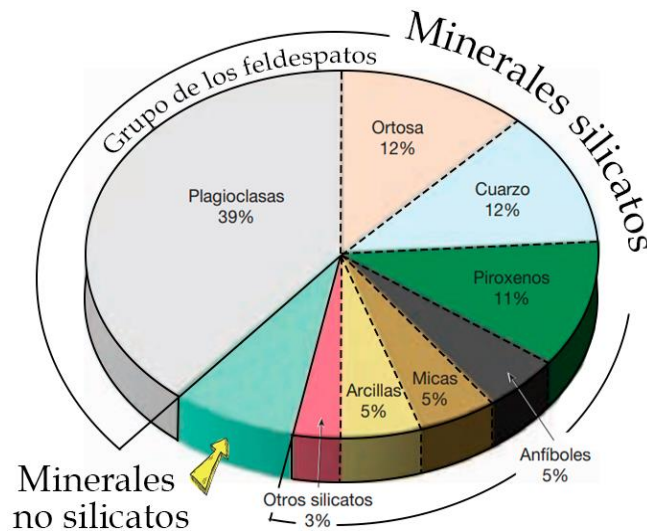
Una **serie mineral**, se presenta cuando existe un rango de composición entre dos especies minerales. Por ejemplo, en el grupo del olivino, se encuentra la serie forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ), fayalita ( $Fe^{2+}_2SiO_4$ ), donde la fayalita es un extremo de la serie, rico en hierro y la forsterita constituye el polo opuesto, rico en Mg, dependiendo de la proporción entre los elementos extremos de la serie, se van nombrando diferentes especies minerales, en este caso la hortonolita sería la especie mineral intermedia de la serie fayalita - forsterita.

Un **grupo mineral** es una agrupación de especies minerales que comparten algunas propiedades químicas comunes y estructura cristalina. El grupo mineral más abundante, es el de los silicatos que contienen el anión ( $SiO_4^{4-}$ ) y representan cerca del 95% de la corteza terrestre, el resto está formado por los grupos de carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ), haluros ( $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $Br^-$ ), óxidos ( $O^{2-}$ ), sulfuros ( $S^{2-}$ ), sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y elementos nativos, entre otros. A continuación, se describirán brevemente estos grupos minerales.

## 3 Grupos minerales

### 3.1 Silicatos

Los silicatos son el grupo de minerales de mayor abundancia (Figura 1), constituyen cerca del 95 % de la corteza terrestre, además dentro de este grupo, se encuentran los principales grupos de minerales formadores de roca (feldespatos, cuarzo, micas, anfíboles, piroxenos y olivino). Son de gran importancia geológica, ya que el estudio de estos minerales nos permite inferir el ambiente en que se formaron, cada silicato, tiene una estructura cristalina y composición química que indican las condiciones bajo las cuales se formó, si fue a grandes profundidades (temperatura y presión elevadas) o cercano a la superficie terrestre (temperatura y presión bajas) o bajo otros tipos de condiciones geológicas.

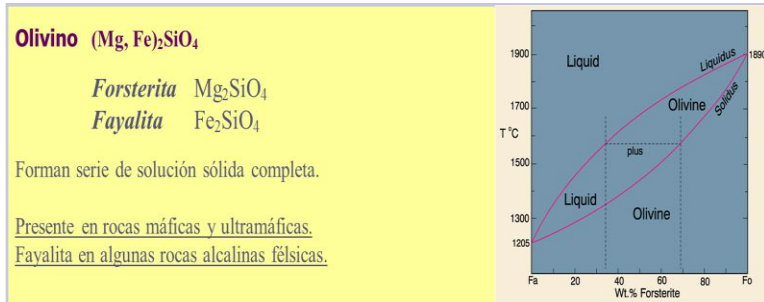
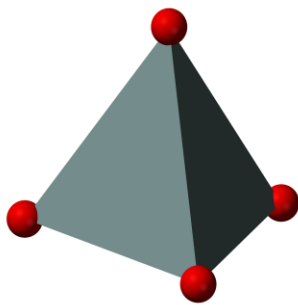


**Figura 1.** Porcentajes estimados (por volumen) de los minerales más comunes en la corteza terrestre. Modificado de E. J. Tarbuck.

Todos los silicatos tienen como componente básico el anión ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), el cual adopta estructura tetraédrica con cuatro átomos de oxígeno rodeando a un átomo de sílice. Las propiedades de estos minerales dependen más de la estructura cristalina en que se arreglan sus átomos, que de los elementos químicos que constituyen su fórmula química, es decir el tipo de enlace químico entre los tetraedros de sílice y oxígeno definirá muchas de las propiedades físicas del mineral. De acuerdo a la forma o arreglo en que se unen estos tetraedros, los silicatos se clasifican en: *Nesosilicatos*, *Sorosilicatos*, *Ciclosilicatos*, *Inosilicatos*, *Filosilicatos* y *Tectosilicatos*.

### 3.1.1 Nesosilicatos

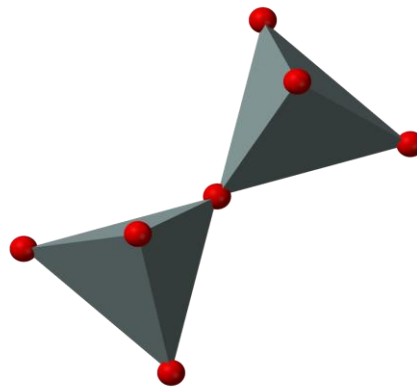
Llamados también Ortosilicatos, son tetraedros aislados, formados por 4 átomos de oxígeno por uno de silicio unidos mediante un enlace covalente (Figura 2 izq.). Puede formar enlaces iónicos con metales tales como: Na, Ca, Fe, Al, K, Mg, etc. También pueden formar series continuas variando el elemento con el que se asocian como en el caso de la serie forsterita – fayalita del grupo del olivino (Figura 44 der.), en que cambia la proporción de Mg (forsterita) y Fe (fayalita).



**Figura 2.** Izq. Modelo poliédrico de la estructura de los nesosilicatos. Der. Serie de solución completa del Olivino de Fayalita (Fe) a Forsterita (Mg).

### 3.1.2 Sorosilicatos

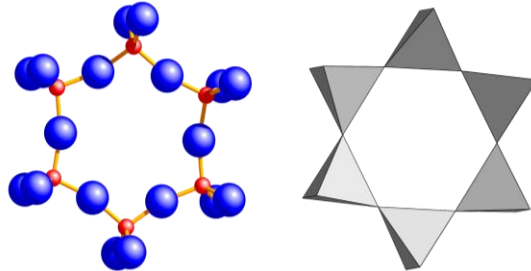
Los tetraedros comparten uno de sus vértices en su estructura (Figura 3), puede tener enlaces iónicos con metales como por ejemplo sodio, calcio, hierro, aluminio, potasio, magnesio, etc. Como ejemplo se tiene la hemimorfita, epidota, zoisita o tanzanita.



**Figura 3.** Modelo poliédrico de los Sorosilicatos.

### 3.1.3 Ciclosilicatos

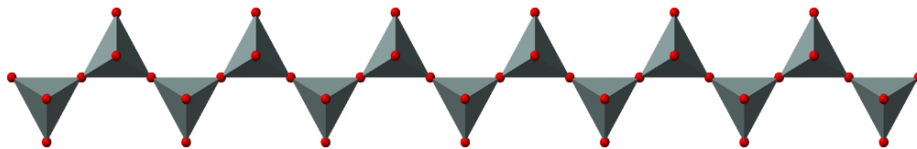
Está integrada por tres o más tetraedros ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) unidos por sus vértices, formando un anillo (Figura 4) cerrado, simple o doble, el cual puede tener enlaces iónicos con un metal, como por ejemplo, Na, Ca, Fe, Al, K, Mg, etc. Algunos ejemplos son: cordierita, dioplasa, berilo.



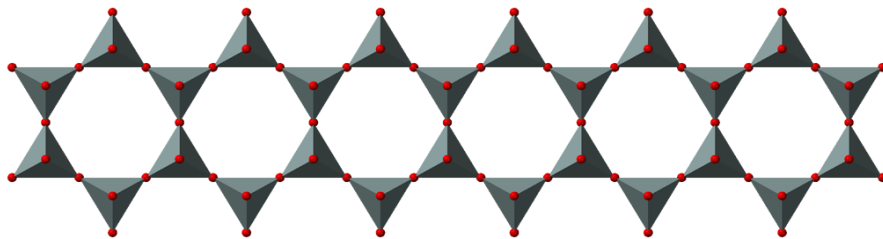
*Figura 4. Esquema de anillos cerrados de Ciclosilicatos.*

### 3.1.4 Inosilicatos

Lo componen grupos de tetraedros ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) unidos en largas cadenas de longitud indefinida. Los más comunes son los piroxenos que presentan cadenas simples (Figura 5), mientras que los anfíboles tienen cadenas dobles (Figura 6). Este tipo de estructura provoca que los minerales presenten hábito fibroso.



*Figura 5. Modelo poliédrico de Inosilicato de cadena simple.*

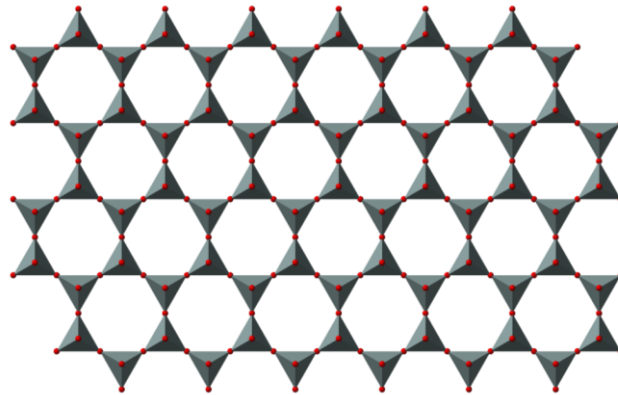


*Figura 6. Modelo poliédrico de Inosilicato de cadena doble.*



### 3.1.4 Filosilicatos

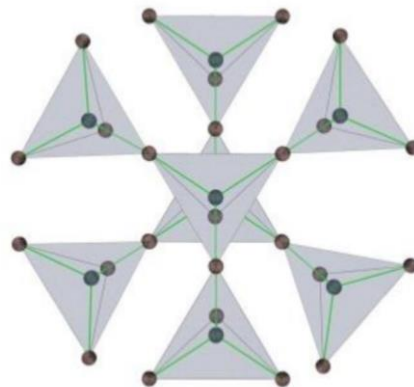
Lo componen grupos de tetraedros ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) unidos por tres vértices a otros, formando una red plana que se extiende en un plano de dimensiones indefinidas (Figura 7). Esta estructura dota a estos silicatos de hábito foliado.



*Figura 7. Modelo poliédrico de Filosilicatos.*

### 3.1.5 Tectosilicatos

Compuestos por grupos de tetraedros ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) unidos por sus cuatro vértices a otros tetraedros, produciendo una malla de extensión tridimensional compleja (Figura 8). La sustitución de silicio por aluminio en algunos tetraedros permite que en la malla se coloquen cationes.



*Figura 8. Modelo poliédrico de Tectosilicatos*

## 3.2 Grupos Minerales No silicatos

Estos grupos de minerales son mucho menos abundantes, pero contienen muchos de los elementos y compuestos de interés económico.

### 3.2.1 Elementos nativos

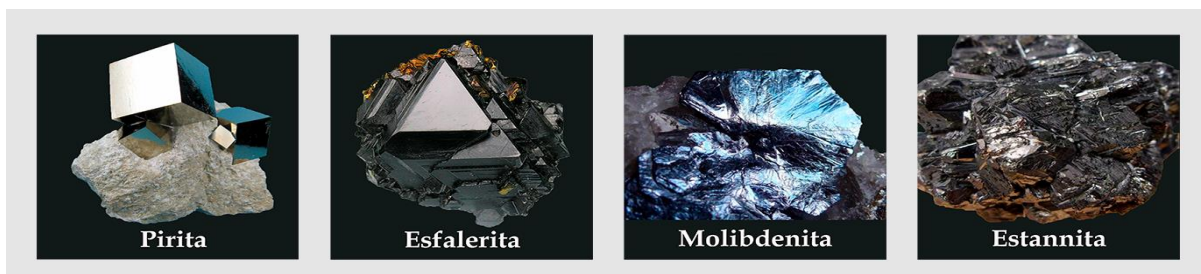
Los elementos nativos son aquellos minerales integrados por elementos que no están unidos químicamente a otros elementos. Este grupo incluye minerales metales nativos, semimetales y no metales, y varias aleaciones sólidas y soluciones. Los metales se mantienen unidos por enlaces metálicos lo que les confiere propiedades físicas distintivas como su lustre metálico brillante, ductilidad y maleabilidad, y conductividad eléctrica. Algunos minerales que pertenecen a este grupo se muestran en la Figura 9.



*Figura 9. Algunos minerales del grupo Elementos nativos (oro, plata, cobre, grafito).*

### 3.2.2 Sulfuros

La clase de los minerales sulfuros y sulfosales, corresponde a la clase 2 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: minerales sulfuros (con el ion  $S^{2-}$ ), los seleniuros, telurios, arseniuros, antimoniuros, bismutiuros, sulfoarseniuros y sulfosales. Se agrupan entre los sulfuros los minerales compuestos de uno o más metales o semimetales con un azufre, que tienen una fórmula de tipo general de  $MmSp$ , donde M es un metal (Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, Ni, Hg, As, Sb, Mo, Hg, Tl, V). En la Figura 10 es posible observar algunos ejemplos de minerales sulfuros.



*Figura 10. Algunos minerales del grupo de los sulfuros (pirita, esfalerita, molibdenita, estannita).*

### 3.2.3 Óxidos

La clase de los minerales óxidos e hidróxidos corresponde a la clase 4 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: óxidos, hidróxidos, vanadatos, arsenitos, antimonitos, bismutitos, sulfitos, selenitos, teluritos y yodatos. Los minerales óxidos se dividen en tres categorías: *óxidos simples*, *hidróxidos* y *óxidos múltiples*. En la Figura 11 se muestran algunos minerales que son parte de este grupo.



*Figura 11. Algunos minerales del grupo Óxidos (anatasa, cuprita, casiterita, magnetita).*

### 3.2.4 Haluros

La clase de los minerales haluros corresponde a la clase 3 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: haluros o halogenuros simples o complejos, con  $H_2O$  o sin ella, así como derivados oxihaluros, hidroxihaluros y haluros con doble enlace. Los minerales haluros son compuestos en los que un halógeno (flúor, cloro, yodo y bromo) es el anión principal. En la Figura 12 se muestran algunos minerales parte de este grupo.



*Figura 12. Algunos minerales del grupo Haluros (halita, silvina, fluorita, bromargirita).*

### 3.2.5 Carbonatos

La clase de los minerales carbonatos y nitratos corresponde a la clase 5 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen carbonatos, carbonatos de uranilo y nitratos. Los minerales carbonatos son aquellos en los que el grupo aniónico principal es un carbonato,  $[\text{CO}_3]^{2-}$ . A continuación, en la Figura 13, se pueden observar algunos minerales de este grupo.



*Figura 13. Algunos minerales del grupo Carbonatos (rodocrosita, smithsonita, dolomita y malaquita).*

### 3.2.6 Sulfatos

La clase de los minerales sulfatos corresponde a la clase 7 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen: sulfatos, selenatos, teluratos, cromatos, molibdatos y wolframatos. Todos los minerales de este grupo, contienen el anión sulfato  $[\text{SO}_4]^{2-}$ . En la Figura 14, pueden observarse algunos minerales que forman parte de este grupo.



*Figura 14. Algunos minerales del grupo Sulfatos (barita, fenicocroita, lindgrenita, anhidrita).*



### 3.2.7 Fosfatos

La clase de los minerales fosfatos corresponde a la clase 8 de la clasificación de Strunz y en ella se incluyen fosfatos, arseniatos y vanadatos. Los minerales fosfatos se caracterizan por el anión fosfato coordinado tetraédricamente  $[\text{PO}_4]^{3-}$ . En la Figura 15 se pueden observar algunos minerales que forman parte de este grupo.



*Figura 15. Algunos minerales del grupo Fosfatos (apatita, vivianita, piromorfita, lazulita).*

### 3.2.8 Compuestos orgánicos y minerales orgánicos

Los compuestos orgánicos, no siempre logran obtener el título de mineral; aunque muchos de ellos cumplen con algunos de los requisitos para ser considerado un mineral (poseen estructura cristalina, son estables a condiciones ambiente, etc.), varios son descartados debido a que no intervino ningún proceso geológico en su formación; por ejemplo, el compuesto orgánico ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) es un oxalato de calcio que producen algunas plantas y que ocurre como cristales, pero no es considerado mineral, sin embargo la whewellita que tiene la misma fórmula química, pero se deposita en venas hidrotermales, sí es considerada un mineral.

Los compuestos orgánicos corresponden a la clase 10 de la clasificación de Strunz 10ed. y en ella se incluyen sales y ácidos orgánicos que aparecen en minas e hidrocarburos. En la Figura 16 se muestran algunos ejemplos de minerales pertenecientes a este grupo.



*Figura 16. Algunos minerales del grupo minerales orgánicos (whewellita, uricita, hoelita y melita).*

## 4 Propiedades físicas de los minerales

Las propiedades físicas de los minerales son el resultado directo de sus características químicas y de su estructura interna cristalina; mediante la identificación de sus propiedades físicas, nos es posible identificar un mineral. De todo el conjunto de propiedades, sólo algunas de ellas son consideradas elementales para la identificación y clasificación de los minerales: *la estructura interna de los cristales (forma sólida de cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas o iones), el lustre, el color, la raya, la dureza, el crucero, el hábito y la fractura*, mientras que otras son consideradas complementarias: *la diafanidad, la densidad relativa, la fluorescencia y fosforescencia, el magnetismo, la radiactividad, la tenacidad, la piezoelectricidad, la solubilidad, el sabor, la reactividad para diluir ácidos o la piezoelectricidad, entre otras*.

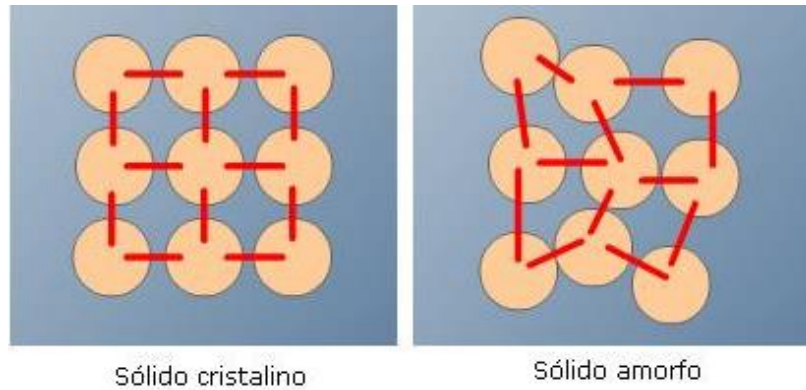
### 4.1 Estructura interna de los cristales

El hecho más importante y fundamental relativo a las sustancias cristalinas es que las partículas que las forman están dispuestas de manera ordenada. Un cristal, por tanto, está formado por un gran número de unidades idénticas y extraordinariamente pequeñas distribuidas en una serie de repetición tridimensional.

Estas unidades idénticas se distribuyen en los puntos de una red tridimensional, que está definida por las tres direcciones y las distancias según las cuales el motivo se repite. Bravais en 1848, demostró que sólo es posible tener catorce tipos de redes espaciales, por lo tanto, a estas redes se les denominó *redes espaciales de Bravais* (Tabla 2). La unidad más simple de una red es un paralelepípedo conocido como *celda unidad*, la cual no puede ser jamás menor que un átomo, debido a que las relaciones entre los átomos y las fuerzas que los unen son factores importantes que determinan las propiedades del cristal. El número de átomos en una celda unidad es, en general, pequeño, entero o un múltiplo de la fórmula química más sencilla. Por ejemplo, en el cuarzo, la unidad estructural tiene  $3(\text{SiO}_2)$ , en la halita  $4(\text{NaCl})$ . Cualquier otra subdivisión menor no tendría las propiedades de la especie mineral.

Los átomos, iones o grupos iónicos que forman el cristal pueden considerarse como empaquetados o apilados según reglas geométricas, alrededor de los nudos, o puntos que definen la Red de Bravais, sin embargo, se ha demostrado que las distintas maneras de empaquetar, combinados con los catorce tipos reticulares, dan lugar a solo 230 maneras posibles de distribución. Estas se conocen como los *grupos espaciales*.

A diferencia de un mineral, que cuenta con una estructura interna definida, los mineraloides y vidrios no ordenan sus átomos en estructuras cristalinas, no son uniformes, y por ello se dice que son sustancias amorfas. Por tal motivo, cuando un mineraloide o un vidrio crece, éste no lo hace con un ordenamiento atómico definido, como lo haría un mineral (Figura 17).



**Figura 17.** Ilustración del ordenamiento de partículas en un sólido cristalino (mineral) y en un sólido amorfo (mineraloide o vidrio).

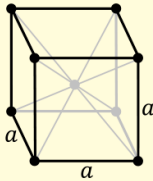
#### 4.1.1 Las redes de Bravais

Como se mencionó anteriormente, los cristales están formados por una repetición periódica de moléculas, átomos o iones en tres dimensiones. El grupo más pequeño de partículas en el material que constituye el patrón repetitivo se le denomina *celda unitaria*. Con una *celda unitaria* se puede definir completamente la simetría y estructura de toda la red cristalina. Se dice que los patrones de repetición están situados a lo largo de la red de Bravais.

Estas redes cristalinas son un agrupamiento de estructuras cristalinas según el sistema axial utilizado para describir su red. Cada sistema de red consiste en un conjunto de tres ejes en una disposición geométrica particular. Existen siete sistemas cristalográficos descritos por las longitudes relativas de los tres ejes cristalográficos (líneas imaginarias dispuestas en las tres direcciones del espacio y convergentes en un punto de origen) y los ángulos que forman entre ellos.

A continuación, en la Tabla 2, se presentan los sistemas cristalográficos en donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  representan los ejes; mientras que  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  representan el ángulo opuesto al eje cristalográfico respectivo (por ejemplo,  $\alpha$  es el ángulo opuesto al eje  $a$ , es decir, el ángulo que forman los ejes  $b$  y  $c$ ).

**Tabla 2.** Clasificación de las catorce redes de Bravais en los siete sistemas cristalinos. Modificado de Giuseppe Grosso y Giuseppe Pastori en *Solid State Physics*.

Sistema cristalino Ejes Ángulos entre ejes	Redes de Bravais				Ejemplos de minerales comunes
	P Celda primitiva o simple	C Primitiva con ejes iguales y ángulos iguales	B Celda centrada en el cuerpo	F Celda centrada en las caras	
<b>Cúbico</b> $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$					 Pirita
<b>Tetragonal</b> $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$					 Zircón
<b>Ortorrómico</b> $a \neq b \neq c \neq a$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$					 Olivino
<b>Hexagonal</b> $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ ; $\gamma = 120^\circ$					 Cuarzo
<b>Trigonal o romboédrico</b> $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$					 Corindón (var. rubí)
<b>Monoclínico</b> $a \neq b \neq c \neq a$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ; $\beta \neq 90^\circ$					 Yeso
<b>Triclínico</b> $a \neq b \neq c \neq a$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ; $\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$					 Cianita o Distena



### 4.1.2 La cristalografía y los Rayos X

La aplicación de los rayos X al estudio de los cristales fue la mayor fuerza dada jamás a la cristalografía. Antes de 1912, los cristalógrafos habían correctamente deducido, a partir de la exfoliación, propiedades ópticas y la regularidad de la forma externa, que los cristales tienen una estructura ordenada; pero la idea de la geometría de las redes cristalinas no pasaba de ser meramente una hipótesis. No fue hasta que se emplearon los rayos X, que fue posible medir la distancia entre planos sucesivos de un cristal, e incluso, determinar la posición de los átomos en el mismo.

Los Rayos X fueron accidentalmente descubiertos por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895 mientras estaba experimentando en la producción de rayos catódicos en tubos de descarga cubiertos con papel negro. El haz de electrones en el tubo de descarga, incidiendo en el vidrio del mismo, producía una radiación X de pequeña intensidad que provocaba la fluorescencia de un material fluorescente próximo. Röntgen, dedujo correctamente que había producido un nuevo tipo de radiación electromagnética penetrante, que denominó rayos X, debido a una serie de misterios relacionados con ella.

No fue sino hasta 1912, por sugerencia de Max von Laue, que los rayos X fueron usados en el estudio de los cristales. Los experimentos iniciales fueron llevados a cabo en la Universidad de Múnich, donde von Laue enseñaba en el departamento del Profesor Sommerfeld, quien estaba interesado en la naturaleza y producción de los rayos X, mientras que Laue estudiaba los fenómenos de interferencia que producían. También en la Universidad Múnich se encontraba Paul Heinrich Groth, un eminente cristalógrafo.

En 1912, Paul Ewald estaba trabajando bajo la dirección de Sommerfeld en su tesis sobre la difracción de ondas luminosas al pasar por un cristal. Pensando en este asunto, von Laue preguntó: ¿Cuál sería el efecto si fuera posible utilizar ondas electromagnéticas con la misma longitud de onda que la distancia interatómica en los cristales?, ¿actuaría el cristal como una red de difracción tridimensional, dando lugar a espectros que pudieran ser registrados? Si sucedía así, sería posible medir con precisión la longitud de onda de los rayos X empleados, suponiendo conocidas las distancias interatómicas en el cristal; o suponiendo la longitud de onda de los rayos X, medir las distancias entre los planos del cristal. Varios experimentos con sulfato de cobre fueron un fracaso, finalmente, hicieron pasar un delgado haz de rayos X por una lámina de exfoliación de blenda (SZn), haciendo que el haz incidiera en una placa fotográfica. Cuando se reveló la placa mostró una serie de pequeñas manchas distribuidas geoméricamente alrededor de una mancha central grande producida por el haz directo de rayos X. Esta figura era idéntica con la predicción de la difracción de los rayos X por un conjunto regular de puntos difusores en el cristal. De esta manera, el experimento demostró la distribución regular de las partículas atómicas en el cristal y que los rayos X tenían una longitud de onda del orden del espacio cristalino.

Posteriormente, los físicos ingleses William Henry Bragg y William Lawrence Bragg (padre e hijo) contribuyeron en 1914 con la estructura del primer compuesto, la halita (NaCl). Además, simplificaron las generalizaciones matemáticas de von Laue en relación con la geometría de la difracción de los rayos X y popularizaron los resultados.

## 4.2 Lustre o brillo

El lustre es el aspecto que presenta la superficie de un mineral al reflejar la luz, una propiedad que no depende del color y sí de su naturaleza química: es más intenso en sustancias que tienen enlaces metálicos y menor en las sustancias que presentan enlaces iónicos o covalentes. El tipo y la intensidad del brillo dependen del índice de refracción y del poder reflector (relación entre la luz absorbida y porcentaje de luz reflejada).

### 4.2.1 Lustre metálico

Cuando los minerales reflejan casi toda la luz visible que reciben, sus índices de refracción son mayores a 3, son opacos a la luz y dan raya de color negro o muy oscuro. Suelen ser metales nativos (cuando no están oxidados), muchos sulfuros (como la pirita y la galena) y óxidos de metales de transición, como la magnetita (Figura 18 izq.).

No existe una línea clara que divida el grupo de los minerales con brillo metálico y no metálico, y ciertos minerales que están entre ambos tipos de brillo, se dice que tienen brillo submetálico (Figura 18 der.).



*Figura 18. Ejemplos de minerales con lustre metálico y submetálico.*

### 4.2.2 Lustre no metálico

Todos los minerales sin aspecto metálico tienen, como el nombre implica, un brillo no metálico. Son en general, de colores claros y transmiten la luz a través de láminas delgadas. La raya de un mineral no metálico es incolora o de color muy débil. A continuación, se describen los términos que se emplean para describir el aspecto de los minerales no metálicos: En la Figura 19, se ilustran estos tipos de brillo.

**Adamantino:** Que tiene un reflejo fuerte y brillante como el diamante. Ello es debido a un índice de refracción alto. Además de los diamantes, algunos minerales transparentes como cerusita y anglesita.

**Vítreo:** aspecto de vidrio, brillo que presenta la superficie de minerales o gemas con índice de refracción no muy alto, como ejemplo se tiene el cuarzo, la apatita y la fluorita.

**Nacarado o perlado:** minerales que presentan una superficie tornasolada, similar al brillo de una perla como el talco, las micas, el yeso y la apofilita.

**Graso:** presenta la apariencia de una superficie aceitosa. Lo tienen la turquesa, la nefelina y el cuarzo lechoso.

**Resinoso:** brillo o apariencia de resina como la esfalerita.

**Sedoso:** característico de minerales fibrosos, como el yeso fibroso y la ulexita.

**Ceroso:** da la apariencia de una superficie de cera.

**Terroso:** cuando no presentan ningún reflejo. Sin brillo.



*Figura 19. Ejemplos de minerales con lustre no metálico.*

## 4.3 Color

Dentro del espectro electromagnético se encuentran todos los posibles niveles de energía de la luz. Hablar de energía es equivalente a hablar de longitud de onda; por ello, el espectro electromagnético abarca todas las longitudes de onda que la luz puede tener. De todo el espectro, la porción que el ser humano es capaz de percibir es muy pequeña en comparación con todas las existentes. Esta región, denominada espectro visible, comprende longitudes de onda desde los 380 nm hasta los 780 nm. La luz de cada una de estas longitudes de onda es percibida en el cerebro humano como un color diferente. En la retina del ojo existen millones de células especializadas en detectar las longitudes de onda procedentes de nuestro entorno. Estas células fotorreceptoras, conos y los bastones, recogen parte del espectro de la luz y, gracias al efecto fotoeléctrico, lo transforman en impulsos eléctricos, que son enviados al cerebro a través de los nervios ópticos, para crear la sensación del color. Cuando la luz incide sobre un objeto, su superficie absorbe ciertas longitudes de onda y refleja otras. Solo las longitudes de onda reflejadas podrán ser captadas por el ojo y por tanto en el cerebro solo se interpretarán esos colores. El color de un mineral es una de sus propiedades físicas más importantes, pero, no siempre es constante, por lo tanto, debe emplearse con precaución en la identificación de ciertas especies. Dicho esto, los minerales se clasifican según su color en tres grupos:

### 4.3.1 Minerales idiocromáticos

Son minerales que siempre presentan el mismo color como la malaquita (verde) y la azurita (azul). Sus colores suelen variar ligeramente debido a la presencia de pequeñas cantidades de otros elementos. Los minerales idiocromáticos son relativamente fáciles de reconocer ya que siempre presentan el mismo color o tonalidades de ese color (Tabla 3).

*Tabla 3. Algunos minerales idiocromáticos comunes y el catión responsable de su color.*

Mineral	Composición	Catión colorante	Color
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Cu	verde
Crisocola	$\text{Cu}_4\text{H}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Cu	azul verdoso
Turquesa	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)(\text{OH})_85\text{H}_2\text{O}$	Cu	azul celeste
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Cu	azul marino
Dioptasa	$\text{Cu}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})6\text{H}_2\text{O}$	Cu	verde
Rodocrosita	$\text{MnCO}_3$	Mn	rosado
Rodonita	$\text{MnSiO}_3$	Mn	rosado
Spersatita	$\text{Mn}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Mn	anaranjado
Granate (Uva)	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Cr	verde
Cromofilita	$\text{KCr}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Cr	verde
Pirita	$\text{FeS}_2$	Fe	amarillo latón
Olivino	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	Mg,Fe	verde
Epidota	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$	Fe	verde pistache

### 4.3.2 Minerales alocromáticos

Son minerales que pueden presentar varios colores y que deben su coloración a pequeñas cantidades de elementos en la composición química general y que son considerados como impurezas. Los iones encargados de impartir el color son llamados cromóforos, usualmente son metales como el hierro, el cromo, el cobre, el vanadio y el manganeso (Tabla 4).

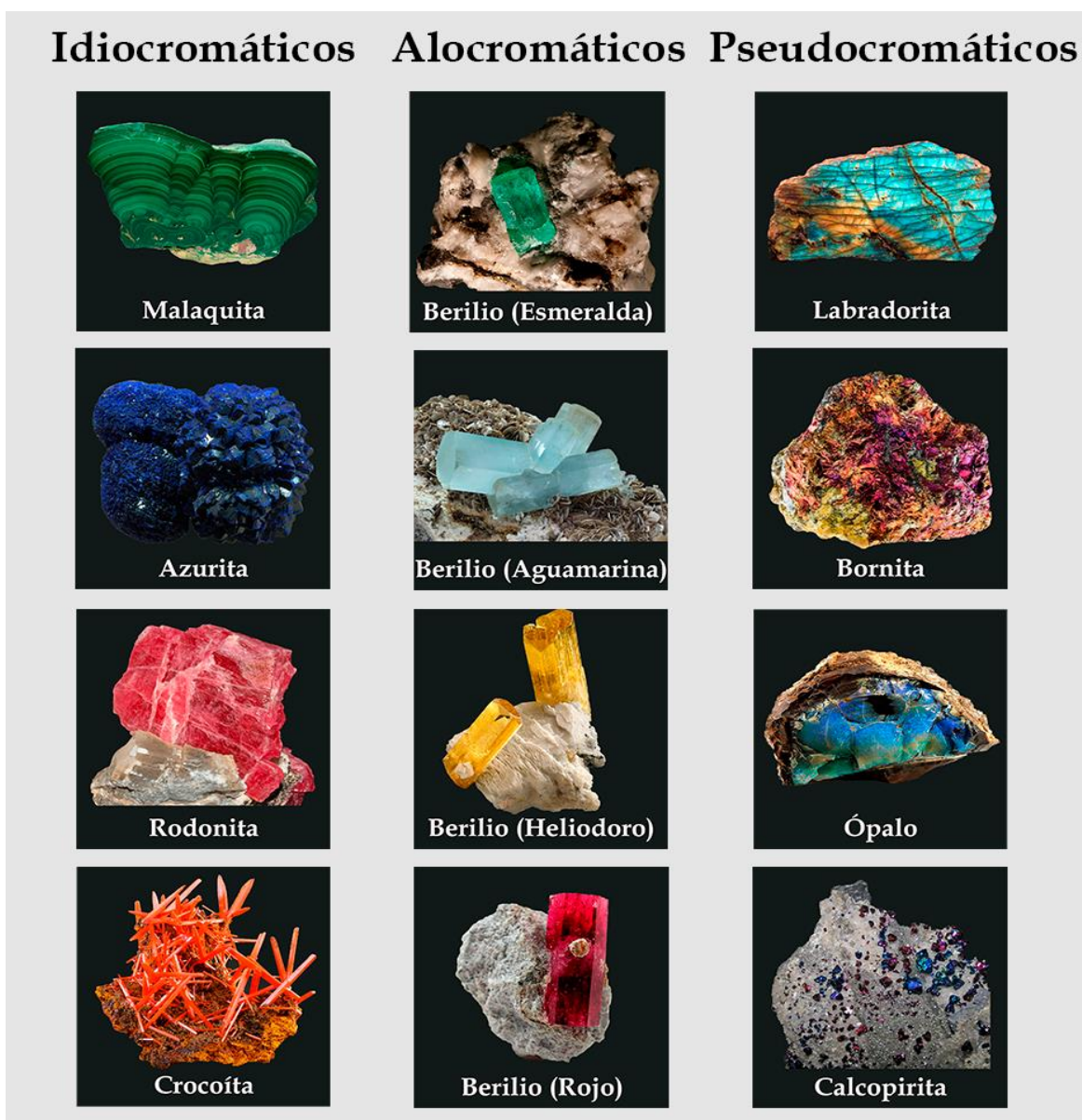
También es posible apreciar cambios en el color de un mineral debido a fenómenos como el *centro de color o centros F*, el cual es un tipo de defecto cristalográfico en el que un anión vacante en un cristal se llena con uno o más electrones, dependiendo de la carga de los iones desaparecidos en el cristal. Los electrones en dichos sitios vacantes o huecos tienden a absorber la luz en el espectro visible de forma que un material que suele ser transparente se vuelve de color. Los centros F son muy frecuentes en cristales de haluros como el fluoruro de calcio, sobre todo de metales alcalinos.

*Tabla 4. Algunos ejemplos de minerales alocromáticos comunes y sus variedades.*

Mineral	Composición	Catión colorante	Color
Berilio Puro	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$		incoloro
Berilio Esmeralda	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Cr o Va	verde
Berilio Aguamarina	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Fe	azul
Berilio Heliodoro	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Fe	amarillo
Berilio Rojo	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Mn	rojo
Berilio Rosa	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Mn	rosado
Corindón Zafiro	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Cr y Ti	azul
Corindón Rubí	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Fe y Cr	rojo
Cuarzo Citrino	$\text{SiO}_2$	Fe	amarillo
Cuarzo Ahumado	$\text{SiO}_2$	Al	gris
Cuarzo Amatista	$\text{SiO}_2$	Fe	morado

### 4.3.3 Minerales pseudocromáticos (efectos de color debidos a fenómenos ópticos)

Los efectos de color se producen en el cristal debido a fenómenos ópticos provocados por la presencia de fracturas, o por la refracción, curvatura, dispersión o interferencia de los rayos luminosos, pudiéndose observar irisaciones, debido a la descomposición de la luz. En la Figura 20 se muestran algunos ejemplos de minerales idiocromáticos, alocromáticos y pseudocromáticos.



*Figura 20. Clasificación por color de los minerales, **idiocromáticos** siempre en las mismas tonalidades de color; **alocromáticos** el mismo mineral se puede presentar de diferentes colores; **pseudocromáticos** o de color falso.*



## 4.5 Raya

La raya de un mineral se refiere al color de un mineral en forma de polvo, que puede o no ser idéntico al color de la muestra de mano. La forma más común de evaluar esta propiedad se hace rayando la muestra de mano contra una placa de porcelana y observando el color del polvo del mineral que queda en la superficie de la placa de porcelana. La raya de un mineral es independiente de los elementos traza o de cualquier alteración de la superficie a causa de la intemperie. La raya es más a menudo distintiva de los minerales metálicos en contraste con los minerales no metálicos (Figura 21).



*Figura 21. Color de raya de algunos minerales, nótese como no siempre el color de la raya es el mismo que el color que presenta la muestra de mano.*

## 4.6 Dureza

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, y las deformaciones permanentes entre otras. En el transcurso de la historia, durante el estudio y clasificación de los minerales, hubo un momento en que se comenzó a hacer pertinente establecer un método que permitiera discernir con mayor precisión los diferentes grados de dureza de las rocas y minerales.

El primer intento de establecer un procedimiento para tal fin, poco científico, pero en la práctica bastante profesional, se debió a Friedrich Mohs. Su sencillez (tanto de memorización como de aplicación), lo ha afianzado en esta posición, ya que puede emplearse directamente en campo, sin embargo, existen otros métodos más precisos para determinar la dureza de un mineral. A continuación, se mencionan algunos de los más utilizados.

### 4.6.1 Escala de dureza de Mohs

Es una relación de diez minerales ordenados por su dureza, de menor a mayor grado. Se utiliza como referencia de la dureza de un material dado. Fue propuesta por el geólogo alemán en 1825 y se basa en el principio de que una sustancia cualquiera puede rayar a otras más blandas, pero no de forma contraria. Mohs eligió diez minerales, a los que asignó un determinado número equiparable a su grado de dureza, estableciendo así una escala creciente. Empezó por el talco, que recibió el número 1, y terminó con el diamante, al que asignó el número 10. Cada mineral raya a los que tienen asignado un número inferior a él, y lo rayan aquellos que tienen un número superior al suyo (Tabla 6).

### 4.6.2 Escala de dureza de Rosiwal











La escala de Rosiwal (Tabla 5) debe su nombre al geólogo austriaco August Karl Rosiwal. Basa su medición en valores absolutos, a diferencia de la escala de Mohs cuyos valores relativos son más apropiados para la investigación de campo (*in situ*). Mide en escala absoluta la dureza de los minerales. Se expresa como la resistencia a la abrasión medida en pruebas de laboratorio tomando como base el corindón con un valor de 1000.

**Tabla 5.** Escala de dureza de Rosiwal.

Mineral	Valor ROSIWAL						
	1	10	100	1000	10000	100000	1000000
Talco	####						
Yeso	#####	#					
Calcita	#####	#####					
Fluorita	#####	#####					
Apatito	#####	#####					
Ortosa	#####	#####	####				
Cuarzo	#####	#####	#####	#			
Topacio	#####	#####	#####	###			
Corindón	#####	#####	#####	#####			
Diamante	#####	#####	#####	#####	#####	#####	##

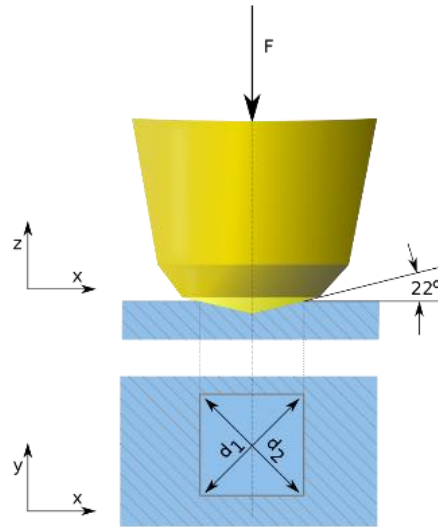


Tabla 6. Escala de dureza de Mohs.

Dureza	Mineral	Imagen	Composición química	Se raya con / raya a
1	Talco		$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Se puede rayar fácilmente con la uña
2	Yeso		$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Se puede rayar con la uña, pero con mayor dificultad
3	Calcita		$CaCO_3$	Se puede rayar con una moneda de cobre
4	Fluorita		$CaF_2$	Se puede rayar con un cuchillo de acero
5	Apatito		$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo de acero
6	Ortoclasa		$KAlSi_3O_8$	Se puede rayar con una lija para acero
7	Cuarzo		$SiO_2$	Raya el vidrio
8	Topacio		$Al_2SiO_4(OH, F)_2$	Rayado por herramientas de carburo de wolframio
9	Corindón		$Al_2O_3$	Rayado por herramientas de carburo de silicio
10	Diamante		C	No se raya con nada a excepción de otro diamante

### 4.6.3 Escala de dureza de Vickers

El ensayo de dureza Vickers, llamado el ensayo universal, es un método para medir la dureza de los materiales, es decir, la resistencia de un material al ser penetrado. El ensayo consiste en presionar una zona de la muestra con un indentador piramidal de diamante, sobre la superficie pulida del material a ensayar, con una fuerza conocida, durante un tiempo de empuje determinado (Figura 22). Las diagonales de la huella resultante se miden usando un microscopio. Este ensayo, puede usarse en superficies no planas. Sirve para medir todo tipo de dureza, y espesores pequeños.



*Figura 22. Esquema del indentador piramidal y la huella que deja*

### 4.7 Exfoliación o crucero

Es la tendencia de un mineral a romperse a través de planos cristalográficos preferenciales, dando como resultado superficies lisas, o casi lisas. Esta propiedad está relacionada con la estructura cristalina, ya que la rotura del mineral se presenta en donde los enlaces atómicos son débiles o donde el espacio entre planos atómicos es mayor dentro de la estructura cristalina del mineral. La calidad de la exfoliación puede ser descrita en función de qué tan limpia y fácilmente se rompe el mineral; los términos con los que se describe comúnmente esa calidad en orden decreciente son: «perfecto», «bueno», «distinto» y «pobre». Existe gran variedad de tipos de crucero:

De forma práctica, la exfoliación que presente un mineral, puede caracterizarse como el número de planos de rotura y el ángulo que forman entre ellos, por ejemplo: una fluorita presenta crucero “bueno a perfecto” en 3 direcciones, con ángulos perpendiculares entre sí, lo que resulta en una exfoliación cúbica. A continuación, se describirán los tipos de exfoliación que presentan los minerales. En la Figura 23 se ilustran los tipos de exfoliación.

**Exfoliación Basal o Planar**, se produce en **una dirección**, en paralelo a la base del cristal, dando como resultado, planos delgados u hojuelas del mineral. La exfoliación basal es exhibida por el grupo de las micas.

**Exfoliación prismática**, se produce en **dos direcciones**, estos planos de rotura, cortan al mineral de dos formas, la primera a  $90^\circ$  como ocurre con los piroxenos, y la segunda es en ángulos de  $60^\circ$  y  $120^\circ$  como en el caso de los anfíboles. La cerusita, tremolita y espodumena exhiben exfoliación prismática.

**Exfoliación cúbica**, se produce en **tres direcciones a  $90^\circ$** , es decir todas perpendiculares entre sí; lo que da como resultado que el mineral se rompa formando cubos. La halita es un mineral común que ejemplifica muy bien este tipo exfoliación, también la fluorita y la galena son minerales relativamente comunes que muestran este crucero.

**Exfoliación romboédrica**, se produce en **tres direcciones diferentes de  $90^\circ$** , dando como resultado prismas de 6 caras, pero los ángulos entre sus planos son diferentes de  $90^\circ$ . La calcita exhibe exfoliación romboédrica perfecta.

**Exfoliación octaédrica**, se produce en **cuatro direcciones**, el mineral es cortado por cuatro conjuntos de planos paralelos que forman un octaedro. El diamante y la fluorita exhiben exfoliación octaédrica perfecta.

**Exfoliación dodecaédrica**, se produce en **seis direcciones**, el mineral es cortado por seis conjuntos de planos paralelos que forman un dodecaedro. La esfalerita presenta este tipo de exfoliación.



*Figura 23. Exfoliación o crucero de los minerales.*

## 4.8 Fractura

Cuando un mineral se rompe en una dirección que no corresponde a un plano de exfoliación se habla de fractura, dicho de otra manera, es la textura y la forma que adquiere la superficie de un mineral cuando se rompe sin seguir planos de exfoliación. Hay varios tipos de fractura mineral, se ilustran en la Figura 24 y se describen a continuación:

**Concoidea:** que se asemeja a las ondas concéntricas de una concha de mejillón. A menudo ocurre en minerales amorfos o de grano fino como sílex, ópalo u obsidiana (la obsidiana es una roca ígnea, no un mineral, pero ilustra bien la fractura concoidea.). También puede ocurrir en minerales cristalinos como el cuarzo. La fractura subconcooidal es similar a la fractura concooidal, pero con una curvatura menos significativa.

**Irregular o desigual:** cuando surgen superficies rugosas e irregulares. Ocurre en una amplia gama de minerales, incluidos arsenopirita, pirita y magnetita.

**Fibrosa o astillosa:** cuando se rompe como una madera formando astillas. Se ve particularmente en minerales fibrosos como la tremolita (asbesto), pero también puede ocurrir en minerales no fibrosos como la cianita.

**Ganchuda o dentada:** cuando la superficie de rotura aparece dentada, irregular y con bordes agudos. A menudo se encuentra en metales nativos como el cobre y la plata.

**Terrosa:** cuando se desmorona como un terrón. Con frecuencia se observa en minerales relativamente blandos y poco unidos, como la limonita, la caolinita y la aluminita.



*Figura 24. Tipos de fractura en los minerales.*

## 4.9 Hábito cristalino

El hábito cristalino representa la apariencia externa o morfología de un mineral o un agregado cristalino a escala macroscópica. La manera en la que crece un mineral se encuentra condicionada por factores externos, como, por ejemplo, las condiciones ambientales y estructurales existentes durante su formación. La estructura cristalina también influye sobre el hábito, aunque muchas veces el aspecto que adquiere un mineral puede parecer que no tenga relación con su estructura cristalina. Minerales con la misma estructura cristalina no tienen por qué presentar el mismo hábito, e incluso un mismo mineral puede aparecer bajo varias formas o hábitos diferentes. A continuación, se describen e ilustran los diferentes tipos de hábitos cristalinos de acuerdo con el Manual de Mineralogía de Dana (1982).

### 4.9.1 Cuando un mineral consta de cristales aislados y distintos

Los minerales que presentan este tipo de hábito cristalino desarrollan cristales que pueden ser identificados como individuos distintos, es decir que se pueden separar con relativa facilidad (Figura 25).

**Acicular:** En forma de aguja, los cristales se observan muy alargados y delgados. Es común en la natrolita, mesolita y la esolecita (todos estos minerales pertenecen al grupo de las zeolitas).

**Capilar o filiforme:** los cristales se desarrollan en forma de cabellos o hebras. Este tipo de hábito es común en la ludlockita y la millerita, entre otros.

**Hojoso o cuchilla:** Se presentan cristales alargados y aplastados como hojas de cuchillos. Es común en la cianita.

**Prismático o columnar:** Cristales que se desarrollan como una sola pieza o individuo, tienen forma alargada y aspecto prismático, es común en minerales del grupo del piroxeno y del anfíbol.



Figura 25. Hábito cristalino en cristales aislados y distintos.



## 4.9.2 Cuando un mineral consta de un grupo de cristales distintos

Los minerales que presentan este tipo de hábito cristalino se desarrollan en grupos de cristales, que se presentan juntos, pero se puede seleccionar solo un cristal de forma relativamente sencilla (Figura 26).

**Dendrítico:** En forma de dendrita. Los cristales se desarrollan adoptando una forma parecida a ramas divergentes y delgadas, incluso dan la apariencia de ser pequeñas hojas de una planta fosilizada. Es común en la pirolusita.

**Reticulados:** Agrupación de cristales delgados que se cruzan, formando un arreglo en forma de redes o retículas. En ocasiones, la cerusita puede presentar este hábito cristalino.

**Divergente o radial:** Grupos de cristales largos y delgados que se disponen de forma radial desde un centro. Es común en la brochantita y en la wavellita.

**Drusa:** Son grupos de pequeños cristales unidos unos a otros que crecen cubriendo una superficie, el aragonito puede presentarse de esta forma.



*Figura 26. Hábito cristalino para un grupo de cristales distintos.*

## 4.9.3 Cuando un mineral consta de grupos de individuos radiales o paralelos

Los minerales que presentan este tipo de hábito cristalino se desarrollan en grupos de cristales, que tienen un crecimiento en paralelo o de forma radial - concéntrica. En este caso los minerales crecen uno a un lado del otro y no es posible seleccionar fácilmente solo uno (Figura 27).

**Lamelar o foliado:** Se presenta como un agregado de cristales en forma de láminas u hojas una encima de la otra, como las hojas de un libro, son relativamente fáciles de separar y son típicas en las micas, como el grupo de la biotita (flogopita, la siderophyllita, la annita y la eastonita).

**Fibroso:** Los cristales se disponen como hilos o fibras. Este tipo de hábito cristalino es común en el crisotilo.

**Estrellado:** Se observan como grupos de cristales con crecimiento radial y concéntrico, como en forma de estrella. Se presenta en la pirofilita.

**Globular:** Se presentan como cristales individuales de forma esférica o semiesférica. La calcita puede presentar este hábito, al igual que la prehnita.

**Mamilar:** Los cristales se desarrollan en masas de forma esférica o semiesférica, redondeadas, que se asemejan a las mamas. Este tipo de hábito es común en la goethita y la hematita, también es posible observarlo en la smithsonita.

**Botroidal:** Se presentan en formas esféricas similares a las mamilares, pero de menor tamaño, en ocasiones se presentan como un racimo de uvas. Es común en la hematita y en ocasiones en la malaquita.

**Reniforme:** Son grupos de cristales radiales que se desarrollan de forma parecida a un riñón. Es común que la hematita presente este tipo de hábito.

**Coloidal:** Resulta con frecuencia difícil distinguir entre los agregados representados en los últimos términos, y como resultado de ello, el término coloidal ha sido propuesto para incluir a todas las formas más o menos esféricas (globular, mamilar, botroidal y reniforme).



*Figura 27. Hábito cristalino para grupos de cristales radiales o paralelos*

#### 4.9.4 Cuando un mineral está formado por escamas o laminillas

Los minerales que presentan este tipo de hábito cristalino crecen formando laminas delgadas o prismas tabulares (Figura 28).

**Exfoliable:** Cuando un mineral se separa fácilmente en hojas o placas, como el clinocloro, que puede presentar este tipo de hábito.

**Micáceo:** Parecido al exfoliable, pero el mineral puede desintegrarse en hojas pequeñísimas, como en el grupo de las micas.

**Laminar o tabular:** Cuando un mineral consta de individuos planos como placas en forma de tabla. Es común en la barita.

**Plumoso:** Formado por prismas finos y alargados con una estructura divergente o plumosa. Ocurre en la auricalcita.



*Figura 28. Hábito cristalino para minerales formados por escamas o laminillas.*

#### 4.9.5 Otros tipos de hábitos cristalinos

Dentro de este grupo, se incluyen todos los hábitos cristalinos que cuentan con características particulares que no permiten englobarlos en los grupos anteriores. Estos hábitos cristalinos se ilustran en la Figura 29.

**Granular:** Formado por un agregado de pequeños granos del mineral, más o menos equidimensionales. Este tipo de hábito es común en la bornita y en el olivino.

**Estalactítico:** Se observa como masas en forma cónica, llegando a formar columnas. Se forman debido a que el agua que fluye en el subsuelo contiene minerales en solución, los cuales precipitan mientras el agua gotea desde el techo hasta la base de una bóveda u oquedad en el subsuelo. La malaquita puede presentarse de esta forma, entre otras.

**Concéntrico:** Consiste en una o más capas circulares superpuestas alrededor de un centro común. Este tipo de hábito puede observarse asociado al hábito estalactítico.

**Oolítico:** Agregado mineral formado por pequeñas masas redondeadas de tamaño inferior a 2 mm., similares a huevos de pescado. Es posible observar este hábito en aragonito y en hematita en menas de hierro, entre otros.

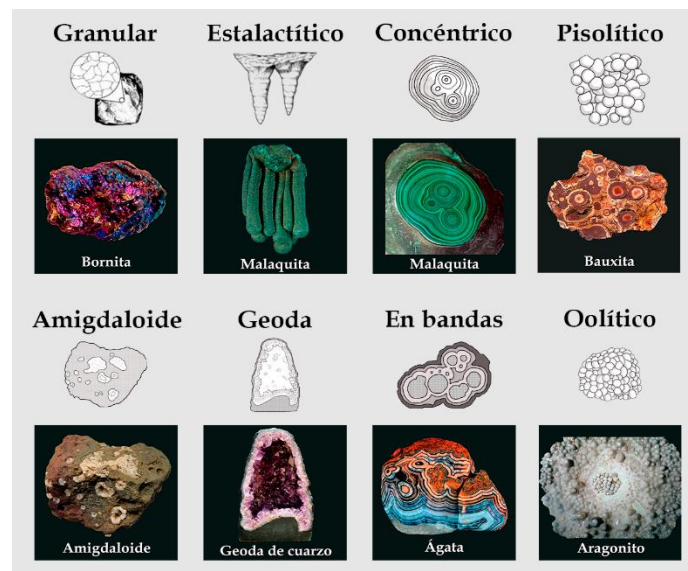
**Pisolítico:** Agregado mineral formado por masas redondeadas de tamaño mayor a 2 mm. Este tipo de hábito es muy común en la bauxita.

**En bandas:** El mineral cristaliza en bandas de diferentes colores y texturas, sin embargo, estas bandas no siempre delimitan una frontera o un cambio en la composición química, por ejemplo, en las ágatas se observan bandas de aspecto diferente, pero la composición química es la misma en cada banda.

**Masivo o compacto:** Agregado mineral formado por material compacto de forma irregular, sin ninguna apariencia peculiar. Estos minerales adoptan estas formas irregulares debido a que los cristales no presentan caras definidas o bien, son de tamaño muy fino. Este tipo de hábito es común en las arcillas.

**Amigdaloides o vesicular:** Este tipo de hábito es común en rocas como el basalto o la andesita, donde se presentan pequeñas oquedades o burbujas de forma semiesférica o irregular (si se unen unas con otras), provocadas por la desgasificación del magma, llamadas vesículas, que posteriormente son ocupadas por minerales que adoptan su geometría.

**Geodas:** Cuando una cavidad en una roca ha sido parcialmente rellenada mediante la deposición de mineral en la superficie interna de la oquedad. Se presenta en cualquier tipo de roca. Lo más común es que los minerales que forman geodas sean silicatos y carbonatos que se encuentran en solución en aguas de percolación o en fluidos hidrotermales.



*Figura 29. Algunos hábitos de agregados cristalinos y de minerales individuales.*

## 4.10 Diafanidad

La diafanidad es una propiedad que describe el comportamiento de la luz al incidir sobre un mineral y el comportamiento de ésta al atravesarlo. Existen tres grados de esta propiedad (Figura 30).

**Transparente:** Un mineral es transparente cuando a través de él, se puede distinguir totalmente cualquier objeto. Cuando la luz incide sobre el mineral, la totalidad o casi toda la luz que incide es transmitida, por lo que es posible ver nítidamente a través de él.

**Translúcido:** Si el mineral transmite parcialmente la luz, los objetos no se pueden ver claramente a través de él, al adelgazarse permite mejorar la transmisión de la luz.

**Opaco:** Cuando un mineral no transmite la luz incluso en láminas delgadas. Toda o casi toda la luz que incide sobre el mineral se refleja o se dispersa, por lo que no es posible observar a través de él.



*Figura 30. Grados de diafanidad de los minerales.*

## 4.11 Tenacidad

Mientras que la fractura y la exfoliación describen las superficies que se crean cuando el mineral se rompe, la tenacidad describe la resistencia que ofrece el mineral a tal rotura, deformación, curvatura, aplastamiento o pulverización. Los minerales pueden ser:

**Frágiles:** No se pueden deformar, al aplicarles una fuerza de tensión se rompen con facilidad. No pueden cortarse en láminas. La mayor parte de silicatos y óxidos se comportan como minerales frágiles.

**Maleables:** Es cuando el mineral, al golpearlo con un martillo, puede dar lugar a hojas delgadas, como por ejemplo el oro, la plata y el cobre.

**Séctiles:** Cuando se puede cortar con un cuchillo y formar virutas delgadas, por ejemplo, la clorargirita.



**Dúctiles:** Se deforman fácilmente bajo tensión, pudiendo ser deformado sin romperse, estirándose hasta formar hilos, por ejemplo, el oro, la plata y el cobre.

**Flexibles:** Son minerales que se pueden doblar fácilmente, entre ellos hay los que se comportan de forma elástica y plástica.

**Elásticos:** cuando al ser doblados recuperan la forma al cesar el esfuerzo, por ejemplo, el grupo de las micas.

**Plásticos:** Mineral que se deforma fácilmente, pero cuando cesa el esfuerzo, no recupera su forma original, por ejemplo, el yeso y el talco.

## 4.12 Magnetismo

El magnetismo es un fenómeno según el cual algunos materiales reaccionan ante un campo magnético, dependiendo del comportamiento del material sometido al campo magnético, se clasifican en:

**No magnético:** No le afecta el paso de líneas de campo magnético, por ejemplo, el cuarzo.

**Diamagnético:** Material débilmente magnético, si se sitúa una barra magnética cerca de él, esta lo repele. El bismuto, la plata y el plomo se comportan de esta manera bajo influjo de un campo magnético.

**Paramagnético:** Presenta un magnetismo significativo, es atraído por la barra magnética, por ejemplo: aluminio y paladio.

**Ferromagnético:** Magnético por excelencia o fuertemente atraído por un imán. Se vuelve paramagnético por encima de la temperatura de Curie. Los minerales ferromagnéticos más comunes son la magnetita y la pirrotina.

## 4.13 Sabor y olor

Algunos minerales también pueden identificarse mediante estas características, aunque se debe tener cuidado al realizar este tipo de pruebas, ya que existen minerales que pueden representar un riesgo a la salud. Un ejemplo para distinguir minerales por su sabor podría ser la halita (NaCl), sal de mesa; tiene sabor salado; por otro lado, su homólogo de potasio, la silvita (NaK), tiene un sabor amargo pronunciado. Algunos minerales que pueden distinguirse por el olfato serían los sulfuros, que tienen un olor característico como a huevo podrido, sobre todo cuando las muestras están fracturadas, reaccionando o pulverizadas.

## 4.14 Radiactividad

La radiactividad es una propiedad poco frecuente en los minerales, aunque algunos pueden integrar elementos radiactivos. Pueden ser constituyentes que los definen, como el uranio en la uraninita, la autunita y la carnotita, o como impurezas traza. En este último caso, la desintegración de los elementos radiactivos que se encuentran en el mineral como impureza, afectan al mineral que lo contiene; el resultado es denominado *halo radiactivo* o *halo pleocroico* (Figura 31).



**Figura 31.** Halo pleocroico alrededor de zircón dentro de biotita, producido por la liberación de partículas radiactivas del zircón hacia la biotita.

# Fuentes de consulta

Akçayır, M., Akçayır, G. (2016). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*.

Anguita, F. y Moreno, F. (1991). "Magmas" Procesos geológicos internos. Editorial Rueda 240 p.

Arévalo, V. (1991). Excavación de Galerías de Inyección, Drenaje e Inspección del Proyecto 3 Hidroeléctrico Zimapán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 51(1), p. 3-9.

Best, M. (1982). *Igneous and metamorphic petrology*. W. H. Freeman & Co., San Francisco, 630 p.

Caudell, T. P. and Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes," *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 659-669 vol.2.

Chávez, D. (2019). Estudio petrográfico, sedimentológico, estructural de la formación Soyatal en el margen occidental de la cuenca de Zimapán, Estados de Querétaro e Hidalgo (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Comisión Nacional del Agua (2008). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estadísticas del Agua en México - Edición 2008. p. 69.

Compton, R.R. (1962). *Manual of Field Geology*. John Wiley & Sons, New York, 378 p.

Dana, J.D., Hurlbut, C. S., Klein, C. (1982). *Manual de Mineralogía de Dana* 3ra ed. Reverte, 564 p.

Domínguez E. & Fernández H. R., (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. *Sistemática y Biología*. Fundación Miguel Lilo, Tucumán, Argentina.

Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture, in Ham, W. E., (ed.), *Classification of carbonate rocks a symposium: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1*, pp. 108–171.

Eckert, M. (2012). «Disputed discovery: the beginnings of X-ray diffraction in crystals in 1912 and its repercussions». *Acta Crystallographica A* 68: 30-30.

Folk, R.L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin*, 43(1), pp. 1-38.

Foyo, A., Tomilo, C., Maycote, J. & Willis, P. (1996). Geological features, permeability and groutability characteristics of the Zimapán Dam foundation, Hidalgo State, Mexico. *ELSEVIER, Engineering Geology*, 46, p. 157-174.

Ganuzza, L., Trippel, J. M., Castro, S., Gazcón, N. (2017). Visualización y Realidad Aumentada en el Campo de las Ciencias Geológicas. *Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI)*, pp. 422-426.

Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes*. Wiley-Blackwell, 428 p

Grosso, G., Parravicini, G. & Patton, B. (2000). *Solid State Physics*. Academic Press, an imprint of Elsevier Press. 722p.

International Mineralogical Association, Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification. (2021). *The New IMA List of Minerals – A Work in Progress – Updated: May 2021*.

Johnson, L., Smith, R., Willis, H., Levine, A., Haywood, K. (2011). *The Horizon Report: Austin, Texas: The New Media Consortium*.

- F. Knoop, C.G. Peters and W.B. Emerson, (1939). "A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, V. 23 n° 1, pp. 39–61.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Ed. Cambridge University Press.
- Lee, K. (2012). Augmented Reality in Education and Training. *TECHTRENDS TECH TRENDS* 56, pp. 13–21.
- Maltman, A. J. (1994). *The geological deformation of sediments*. London: Chapman and Hall. 362 p.
- Martínez Landa, H. (2015). *Problems analysis and solutions for the establishment of augmented reality technology in maintenance and education*. Tampere University of Technology.
- Neuendorf, K.K.E., J.P. Mehl, Jr., and J.A. Jackson, J.A. (2005). *Glossary of Geology* (5th ed.). Alexandria, Virginia, American Geological Institute. 779 p.
- Nickel, E.H. (1995) *The Definition of a Mineral*. *The Canadian Mineralogist*, 33, pp. 689-690.
- Passchier, C.W.; Trouw, R.A.J. (2005). *Microtectonics*. Springer, Berlin, 353 p.
- Pettijohn, F.J. (1954). Classification of sandstones. *The Journal of Geology*, 62(4), pp. 360-365.
- Philips, J. (1985). *Manual of Geology: Theoretical and Practical*. Ed. Charles Griffin and Company, Universidad de Michigan, 546 p.
- Ponce J. J. *et al.*, (2018). *Atlas de estructuras sedimentarias inorgánicas y biogénicas*, Fundación YPF, 166 p.
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23, pp. 117-119.
- Ramdohr, P. (1980). *The ore minerals and their intergrowths*, 4th edition, pp. 1071–1076.
- Rodríguez, V. (1988). *Geología y geotecnia del vaso y boquilla del P. H. Zimapán, sobre el río Moctezuma, estados de Hidalgo y Querétaro* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ruiz Torres. (2013). *La realidad aumentada y su aplicación en el patrimonio cultural*, Trea, 196 p.
- Streckeisen, A.L. (1973). *Plutonic Rocks: Classification and Nomenclature Recommended by the I.U.G.S. Sub-Commission on the Systematic of Igneous. Rocks*, *Geo, Times*, 18, pp. 26-30.
- Strunz, H.; Nickel, E. H. (2001). *Strunz Mineralogical Tables* (9ª edición). Stuttgart: Schweizerbart. 869 p.
- Tarback, E.J., Lutgens F.K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*, trad. de 8ª ed. Pearson, Prentice Hall, 686 p.
- Toledo Morales & Sánchez García. (2018). Use of augmented reality in social sciences as education resource. *Turkish online journal of distance education - TOJDE*, 19(3), pp. 38-52.
- Torres Roldán, R. L. (2004). *Petrología Metamórfica, asistente para prácticas*, Universidad de Granada, España.
- Vera Torres, J. A. (1994). *Estratigrafía. Principios y métodos*. Madrid: Editorial Rueda. pp. 93-101.
- Winter J. D. (2014). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Pearson. 2nd Edition. 745 p.

# Créditos de imágenes

\*Todas las imágenes de minerales utilizadas son de dominio público, bajo licencia “Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported”. Se realizaron modificaciones al fondo de las imágenes con el propósito de homogeneizar aspectos visuales para este trabajo. A continuación, se hace referencia a los archivos utilizados y sus respectivos autores, quienes manifiestan dar permiso de utilizar, distribuir y modificar las imágenes para el propósito que a uno convenga, pero dando crédito al autor respectivo y proporcionando el link de donde se obtuvieron. Este trabajo no tiene un fin de lucro; su principal propósito es académico.

**Figura 9.** Algunos minerales del grupo Elementos nativos (oro, plata, cobre, grafito).

**Oro nativo** - Localidad: Mina Eagle's Nest, Placer County, California, USA. Autor: Jordi Fabre.  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=42098&searchterms=oro%20nativo&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=42098&searchterms=oro%20nativo&searchauthor=-)

**Plata nativa** - Localidad: Mina Himmelsfist, Freiberg, Erzgebirge, Sajonia, Alemania. Autor: Jordi Fabre  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=42111&searchterms=plata&searchauthor=->

**Cobre nativo** - Localidad: Las Herrerías, Puebla de Guzmán, Huelva, España. Autor: Nerofis2.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=48924&searchterms=cobre&searchauthor=->

**Grafito** - Localidad: Pedrera Turó de Montcada, Montcada i Reixac, Comarca Vallés Occidental, Barcelona, España. Autor: Adri Rodríguez  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=119739&searchterms=Grafito&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=119739&searchterms=Grafito&searchauthor=-)

**Figura 10.** Algunos minerales del grupo de los sulfuros

**Pirita** - Localidad: Navajún, Rioja, España. Autor: Carles Millán.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2780M-pyrite1.jpg>

**Esfalerita** - Mina Idarado, Telluride, Ouray District, San Miguel County, Colorado, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sphalerite-221270.jpg>

**Molibdenita** - Localidad: Mina Moli Hill, La Motte, Abitibi-Temiscaminge, Quebec, Canadá. Autor: Javier Ruiz Martín  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=78127&searchterms=Molibdenita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=78127&searchterms=Molibdenita&searchauthor=-)

**Estannita** - Localidad: Ciudad de Oruro, Provincia Cercado, Departamento Oruro, Bolivia. Autor: J. G. Alcolea  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=110889&searchterms=estannita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=110889&searchterms=estannita&searchauthor=-)

**Figura 11.** Algunos minerales del grupo Óxidos

**Anatasa** - Localidad: Sierrilla de Aguas Vivas, Cáceres capital, Extremadura, España. Autor: Cristalino.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=78120&searchterms=anatasa&searchauthor=->

**Cuprita** - Localidad: Mina Oeste Mashamba, Distrito Kolwezi, Katanga (Shaba), República del Congo. Autor: Parent Géry  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuprite\\_kolwezite\\_dolomite\\_2.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuprite_kolwezite_dolomite_2.JPG)

**Casiterita** - Localidad: Mina Viloco, Provincia Loayza, La Paz, Bolivia. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cassiterite-178922.jpg>

**Magnetita** - Localidad: Cerro Huañquino, Potosí Department, Bolivia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-118736.jpg>

**Figura 12.** Algunos minerales del grupo Haluros

**Halita** - Localidad: Salinas de Imón, Sigüenza, Guadalajara, Castilla-La Mancha, España. Autor: Javier Ruiz Martín  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=56022&searchterms=halita&searchauthor=->

**Silvina** - Localidad: Mina Nieves, Muntanya de Sal, Cardona, Comarca Bages, Barcelona, Catalunya, España.  
Autor: Ismael Mendoza  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=67748&searchterms=silvina&searchauthor=->

**Fluorita** - Localidad: Mina Ojuela, Mapimí, Durango, México. Autor: Edelmin  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=28824&searchterms=fluorita&searchauthor=->

**Bromargirita** - Localidad: Broken Hill, Condado Yancowinna, New South Wales, Australia. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bromargyrite-rh3-12b.jpg>

**Figura 13.** Algunos minerales del grupo Carbonatos

**Rodocrosita** - Localidad: Mina Capillitas, Catamarca, Argentina. Autor: Javier Ruiz Martín  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=43219&searchterms=rodocrosita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=43219&searchterms=rodocrosita&searchauthor=-)

**Smithsonita** - Localidad: Mina Kelly, Distrito Magdalena, Socorro, Nuevo México, EEUU. Autor: Alcinoe.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smithsonite\\_HMNH1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smithsonite_HMNH1.jpg)



**Dolomita** – Localidad: Cantera Azkarate. Euguí. Navarra, España. Autor: Oscar Fernández Arcís  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=75700&searchterms=Dolomita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=75700&searchterms=Dolomita&searchauthor=-)

**Malaquita** – Localidad: Mina L'Etoile du Congo, Katanga, República Democrática del Congo. Autor: Miguel Calvo  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite\\_Congo.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite_Congo.jpg)

**Figura 14.** Algunos minerales del grupo Sulfatos

**Barita** – Localidad: Cerro Huarihuyn, Miraflores, Huamalíes, Huánuco, Perú. Autor: Carles Millán  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=37857&searchterms=barita&searchauthor=->

**Fenicocroíta** – Localidad: Mina San Francisco, Caracoles, Sierra Gorda, Tocopilla, Chile. Autor: Christian Rewitzer  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phenicochroite-212833.jpg>

**Lindgrenita** – Localidad: Mina San Samuel, Carrera Pinto, Distrito Cachiyuyo de Llampos, Provincia Copiapó, Región Atacama, Chile. Autor: Christian Rewitzer  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=88862&searchterms=lindgrenita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=88862&searchterms=lindgrenita&searchauthor=-)

**Anhidrita** – Localidad: Mina de Naica, Chihuahua, México. Autor: Alcinoe.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anhydrite\\_HMNH1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anhydrite_HMNH1.jpg)

**Figura 15.** Algunos minerales del grupo Fosfatos

**Apatita** – Localidad: Minas de La Celia (Del Carmen). Jumilla, Murcia, España. Autor: Daniel Agut.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=47918&searchterms=apatito&searchauthor=->

**Vivianita** – Localidad: Mina Colavi, Machacamarca, Cornelio Saavedra, Potosí, Bolivia. Autor: Carles Millán.  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=58480&searchterms=vivianita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=58480&searchterms=vivianita&searchauthor=-)

**Piomorfita** – Localidad: Mina Resuperferolítica, Santa Eufemia, Córdoba, Andalucía, España. Autor: Carlos Pareja  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=989&searchterms=piomorfitita&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=989&searchterms=piomorfitita&searchauthor=-)

**Lazulita** - Localidad: Ladjuar Medam, Distrito Sar-e-Sang, Provincia Badakhshan, Afganistán. Autor: Parent Géry  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lazurite\\_afghanite\\_et\\_pyrite\\_sur\\_calcite\\_\(Sar-e-Sang\\_Koksha\\_Valley\\_Badakhshan\\_-\\_Afghanistan\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lazurite_afghanite_et_pyrite_sur_calcite_(Sar-e-Sang_Koksha_Valley_Badakhshan_-_Afghanistan).jpg)

**Figura 16.** Algunos minerales del grupo minerales orgánicos

**Whewellitita** – Localidad: Burgk, Dresden, Saxony, Alemania. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Whewellite-d7b.jpg>

**Uricita** – Localidad: Mina El Entredicho. Autor: Borja Sainz de Baranda. <https://www.mindat.org/photo-934381.html>

**Hoelita** – Localidad: Carolaschacht Mine, Freital near Dresden, Saxony, Alemania. Autor: Thomas Witzke

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoelite\\_sulfur\\_-\\_Carolasschacht\\_Mine,\\_Freital,\\_Saxony,\\_Germany.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoelite_sulfur_-_Carolasschacht_Mine,_Freital,_Saxony,_Germany.jpg)

**Melita** – Localidad: Luschtitz, Bílina, Ústí, Bohemia, República Checa. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mellite-242353.jpg>

**Tabla 2.** Clasificación de las catorce redes de Bravais en los siete sistemas cristalinos.

**Pirita** - Localidad: Navajún, Rioja, España. Autor: Carles Millán.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2780M-pyrite1.jpg>

**Zircón** - Localidad: Gilgit, Distrito Gilgit, Área Norte, Pakistán. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zircon-dtn1a.jpg>

**Olivino** - Localidad: Naran-Kagan, Distrito Kohistan, Pakistán. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olivine-gem7-10a.jpg>

**Cuarzo** - Localidad: Mina Gerais, Brasil. Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz\\_Br%C3%A9sil.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz_Br%C3%A9sil.jpg)

**Corindón** - Localidad: Mina Jagdalek, Surobi, Kabul, Afganistán. Autor: Desconocido.  
<https://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=Corundum-Ruby-AB29M4f.jpg&LANG=ES>

**Yeso** - Localidad: Lubin, Polonia. Autor: Elade53.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gips\\_-\\_Lubin,\\_Poland.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gips_-_Lubin,_Poland.jpg)

**Cianita** - Localidad: No publicada. Autor: Chris 73.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KyaniteUSGOV.jpg#globalusage>

**Figura 18.** Ejemplos de minerales con lustre metálico y submetálico.

**Pirita** - Localidad: Navajún, Rioja, España. Autor: Carles Millán.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2780M-pyrite1.jpg>

**Galena** - Localidad: Mina Elmwood, Tennessee, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite-Galena-elm56c.jpg>

**Magnetita** - Localidad: Cerro Huañuquino, Potosí Department, Bolivia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-118736.jpg>

**Grafito** – Localidad: Museo Nacional de Praga, República Checa, muestra originaria de República Checa. Autor: Karelj.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grafit\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grafit_1.jpg)

**Ilmenita** – Localidad: Montérégie, Quebec, Canadá. Autor: Modris Baum.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilmenite-173863.jpg>

**Cuprita** - Localidad: Namibia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuprite-37848.jpg>

**Figura 19.** Ejemplos de minerales con lustre no metálico.

**Diamante** - Localidad: desconocida. Autor: Steve Jurvetson.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apollo\\_synthetic\\_diamond.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apollo_synthetic_diamond.jpg)

**Cerusita** - Localidad: Mina Tsumeb, d'Otjikoto (Oshikoto), Namibia. Autor: Didier Descouens.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cerusitetsumeb2.jpg>

**Zircón** - Localidad: Gilgit, Distrito Gilgit, Área Norte, Pakistán. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zircon-dtn1a.jpg>

**Calcita** - Localidad: Mina Jiepaiyu, Changde, Provincia Hunan, China. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite-67881.jpg>

**Cuarzo** - Localidad: Mina Gerais, Brasil. Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz\\_Br%C3%A9sil.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz_Br%C3%A9sil.jpg)

**Turmalina** - Localidad: Distrito Ambositra, Amoron'i Mania, Madagascar. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tourmaline-121240.jpg>

**Moscovita** - Localidad: Mina Gerais, Región Sudeste, Brasil. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muscovite-Albite-122887.jpg>

**Estilbita** - Distrito Jalgaon, Maharashtra, India. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorapophyllite-Stilbite-Ca-indi-52b.jpg>

**Talco** - Localidad: Goiás, Brasil. Autor: Eurico Zimbres.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TalcoEZ.jpg>

**Ópalo** - Localidad: Queensland, Australia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opal-53714.jpg>

**Cordierita** - Localidad: Roccatederighi, Roccastrada, Toscana, Italia. Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cordierite\\_Italie.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cordierite_Italie.jpg)

**Serpentinita** - Localidad: Quebec, Canadá. Autor: James St. John.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentinite\\_\(Theftord\\_Mines\\_Ophiolite\\_Complex,\\_Ordovician;\\_Theftord\\_Mines\\_area,\\_Quebec,\\_Canada\\_\(16754387848\)\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentinite_(Theftord_Mines_Ophiolite_Complex,_Ordovician;_Theftord_Mines_area,_Quebec,_Canada_(16754387848)).jpg)

**Esfalerita** - Localidad: Áva, Camaleñ, Cantabria, España. Autor: J. Callén.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfalerita\\_\(Blenda\\_a\\_caramelada\)\\_%C3%A9liva,\\_Cantabria.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfalerita_(Blenda_a_caramelada)_%C3%A9liva,_Cantabria.jpg)

**Azufre** - Localidad: Mina Vergel, Mapimí, Durango, México. Autor: Luis Edmundo Sánchez Roja.  
<https://www.mineralogia.es/largephoto.php>

**Andradita (Granate)** - Localidad: Antetzebato, Madagascar. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Andradite-dem13a.jpg>

**Tremolita** - Localidad: Campolungo, Ticino, Suiza. Autor: Didier Descouens.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tremolite\\_Campolungo.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tremolite_Campolungo.jpg)

**Ulexita** - Localidad: Boron, Condado Kern, California, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ulexite-Calcite-40062.jpg>

**Selenita (Yeso)** - Localidad: Distrito Santa Eulalia, Aquiles Serdán, Chihuahua, México. Autor: Parent Géry.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gypses%C3%A9lita\\_3.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gypses%C3%A9lita_3.jpeg)

**Caolinita** - Localidad: Condado Twiggs, Georgia, EEUU. Autor: James St. John.  
<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/32350111650/>

**Bauxita** - Localidad: Arkansas, EEUU. Autor: James St. John.  
<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/8284195215/>

**Priceíta** - Localidad: No publicada. Autor: Dave Dyet.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Priceite\\_3154.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Priceite_3154.jpg)

**Jadeíta** - Localidad: Myanmar. Autor: Dave Dyet.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jadeite\\_Sodium\\_aluminum\\_silicate\\_Burma\\_3025.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jadeite_Sodium_aluminum_silicate_Burma_3025.jpg)

**Calcedonia (Silíce)** - Localidad: Rio Grande do Sul, Brasil. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz-83325.jpg>

**Figura 20.** Clasificación por color de los minerales

**Malaquita** - Localidad: Mina L'Etoile du Congo, República Democrática del Congo. Autor: Miguel Calvo.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite\\_Congo.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite_Congo.jpg)

**Berilio (Esmeralda)** - Localidad: Mina Muzo, Colombia. Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emeraude\\_Musso.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emeraude_Musso.jpg)

**Labradorita** - Localidad: Madagascar. Autor: Kluka.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Labradoryt,\\_Madagaskar.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Labradoryt,_Madagaskar.JPG)

**Azurita** - Localidad: Mina Shilu Copper, Provincia Guangdong, China. Autor: Eric Hunt.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azurite\\_from\\_China.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azurite_from_China.jpg)

**Berilio (Aguamarina)** - Localidad: Valle Nagar Hunza, Pakistán. Autor: Gunas Ries.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Aquamarine\\_P1000141.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Aquamarine_P1000141.JPG)

**Bornita** - Localidad: No publicada. Autor: Sam Droege.  
<https://www.flickr.com/photos/usgsbiml/9550144642/>

**Rodonita** - Localidad: Mina Morro da Mina, Minas Gerais, Brasil. Autor: Géry Parent.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rhodonite,\\_pyrite,\\_quartz\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rhodonite,_pyrite,_quartz_1.jpg)

**Berilio (Heliodoro)** - Localidad: Minas Gerais, Brasil.  
Autor: FDMinerals  
<https://www.fDMINerals.es/2019/05/11/heliodoro/>

**Ópalo** - Localidad: Queensland, Australia.  
Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opal-53714.jpg>

**Crocoíta** - Localidad: Mina Adelaide, Distrito Zeehan, Tasmania, Australia. Autor: Juergen Merz.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crocoite-360746.jpg>

**Berilio (Rojo)** - Localidad: Montañas Wah Wah, Condado Beaver, Utah, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beryl-235618.jpg>

**Calcopirita** - Localidad: Mina Casteel, Condado Iron, Missouri, EEUU. Autor: James St. John  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chalcopyrite\\_\(Casteel Mine, Iron County, Missouri, USA\) 1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chalcopyrite_(Casteel_Mine,_Iron_County,_Missouri,_USA)_1.jpg)

#### **Figura 21.** *Color de raya de algunos minerales*

**Calcantita** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chalcanthite\\_-\\_streak\\_color.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chalcanthite_-_streak_color.JPG)

**Galena** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galena\\_-\\_Streak\\_color.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galena_-_Streak_color.JPG)

**Oropimente** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orpiment\\_-\\_streak\\_color.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orpiment_-_streak_color.jpg)

**Azufre** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sulfur\\_-\\_Streak\\_color.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sulfur_-_Streak_color.JPG)

**Esfalerita** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sphalerite\\_-\\_Streak\\_color.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sphalerite_-_Streak_color.JPG)

**Piromorfita** - Localidad: No publicada. Autor: Ra'ike  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyromorphite\\_-\\_Streak\\_color.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyromorphite_-_Streak_color.JPG)

#### **Tabla 6.** *Escala de dureza de Mohs.*

**Talco** - Localidad: Goiás, Brasil. Autor: Eurico Zimbres.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TalcoEZ.jpg>

**Yeso** - Localidad: Fuentes de Ebro, Zaragoza, España.  
Autor: J. Callén.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gypsum\\_Zaragoza\\_Spain.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gypsum_Zaragoza_Spain.jpg)

**Calcita** - Localidad: Mina Jiepaiyu, Shimen, Provincia Hunan, China. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite-67881.jpg>

**Fluorita** - Localidad: Mina Elmwood, Condado Smith, Tennessee, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barite-Fluorite-elm44a.jpg>

**Apatito** - Localidad: Durango, México. Autor: Robert M. Lavinsky

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apatite-52267.jpg>

**Ortoclasa** - Localidad: Minas Gerais, Región Sudeste, Brasil.  
Autor: Didier Descouens.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OrthoclaseBresil.jpg>

**Cuarzo (cristal de roca)** - Localidad: Minas Gerais, Región Sudeste, Brasil. Autor: Didier Descouens.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Quartz\\_Br%C3%A9sil.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Quartz_Br%C3%A9sil.jpg)

**Topacio** - Localidad: Maynard's Claim, Condado Juab, Utah, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Topaz-k312b.jpg>

**Corindón** - Localidad: Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil.  
Autor: Eurico Zimbres  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CorindonEZ.jpg>

**Diamante** - Localidad: Mina Kimberley, Provincia Northern Cape, Sudáfrica. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond-gem7-52a.jpg>

#### **Figura 23.** *Exfoliación o crucero de los minerales*

**Biotita** - Localidad: Wannenköpfe, Ochtendung, Región Eifel, Alemania. Autor: Fred Kruijten  
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite\\_aggregate\\_-\\_Ochtendung,\\_Eifel,\\_Germany.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite_aggregate_-_Ochtendung,_Eifel,_Germany.jpg)

**Augita (Piroxeno)** - Localidad: Volcán Muhavura, Ruanda.  
Autor: Didier Descouens  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Augite\\_Rwanda.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Augite_Rwanda.jpg)

**Halita** - Localidad: Salinas de Imón, Sigüenza, Guadalajara, Castilla-La Mancha, España. Autor: Javier Ruiz Martin  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=56022&searchterms=halita&searchauthor=>

**Calcita** - Localidad: Goslerwand, Osttiro, Austria. Autor: Tia Monto. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite\\_3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite_3.jpg)

**Fluorita** - Localidad: No publicada, Autor: Ryan Salisbury  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorite\\_crystals\\_\(rotated\\_90\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorite_crystals_(rotated_90).jpg)

**Esfalerita** - Localidad: Túnel José Maestre. Portman, Cartagena, Murcia. Autor: J. Callén  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfalerita\\_Portman%203%20A1n.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfalerita_Portman%203%20A1n.jpg)

#### **Figura 24.** *Tipos de fractura de los minerales.*

**Obsidiana** - Localidad: No publicada, Autor: Alexander Krassotkin.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:13\\_years\\_of\\_Russian\\_Wikinews\\_in\\_Moscow\\_21.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:13_years_of_Russian_Wikinews_in_Moscow_21.jpg)

**Tremolita** - Localidad: Campolungo, Valle Piumogna, Leventina, Ticino, Suiza. Autor: Leon Hupperichs  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tremolite-363511.jpg>

**Magnetita** - Localidad: Cerro Huañequino, Potosí Department, Bolivia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-118736.jpg>

**Cobre nativo** – Localidad: Las Herrerías, Puebla de Guzmán, Huelva, España. Autor: Nerofis2.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=48924&searchterms=cobre&searchauthor=->

**Limonita** – Localidad: Cantera Brunita, La Peraleja, La Unión, Murcia, España. Autor: Pedro Conesa.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=79228&searchterms=limonita&searchauthor=->

**Figura 25. Hábito cristalino en cristales aislados y distintos**

**Natrolita** – Localidad: Distrito Nasik, Maharashtra, India. Autor: Didier Descouens  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Natroliteinde1.jpg>

**Ludlockita** – Localidad: Mina Tsumeb, Tsumeb, Namibia. Autor: Rewitzer Christian  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=46492&searchterms=ludlockita&searchauthor=->

**Cianita** – Localidad: Desconocida. Autor: Chris73  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KyaniteUSGOV.jpg>

**Berilio (Esmeralda)** - Localidad: Mina Muzo, Colombia. Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emeraude\\_Musso.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emeraude_Musso.jpg)

**Figura 26. Hábito cristalino para un grupo de cristales distintos.**

**Pirolusita** – Localidad: Herce - Rioja Baja - La Rioja – España. Autor: Martí Rafael.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=73140&searchterms=pirolusita&searchauthor=->

**Cerusita** – Localidad: Mina Luis, Castilla La Mancha, España. Autor: Carlos Pareja  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=51978&searchterms=cerusita&searchauthor=->

**Brochantita** – Localidad: Mina Ingadanais, Distrito Castelo Branco, Portugal. Autor: Leon Hupperichs.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brochantite-92159.jpg>

**Aragonito** – Localidad: Mina Northern Lights, Mineral County, Nevada, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aragonite-210767.jpg>

**Figura 27. Hábito cristalino para grupos de cristales radiales o paralelos.**

**Biotita** - Localidad: Wannenköpfe, Ochtendung, Región Eifel, Alemania. Autor: Fred Kruijen  
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite\\_aggregate\\_-\\_Ochtendung,\\_Eifel,\\_Germany.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite_aggregate_-_Ochtendung,_Eifel,_Germany.jpg)

**Tremolita** – Localidad: Campolungo, Valle Piumogna, Leventina, Ticino, Suiza. Autor: Leon Hupperichs  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tremolite-363511.jpg>

**Pirofilita** – Localidad: Mina Champion, California, Estados

Unidos. Autor: Frederic Varela Balcells.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=24606&searchterms=pirofilita&searchauthor=->

**Calcita Globular** – Localidad: Illinois, EEUU. Autor: James St. John  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite\\_\(Cave-in-Rock\\_Mining\\_District,\\_Illinois,\\_USA\)\\_3\\_\(26202624217\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite_(Cave-in-Rock_Mining_District,_Illinois,_USA)_3_(26202624217).jpg)

**Malaquita** – Localidad: Katanga Copper, República democrática del Congo (Zaire). Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite\\_Kolwezi\\_Katanga\\_Congo.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite_Kolwezi_Katanga_Congo.jpg)

**Hematita** – Localidad: Mina Santa Rosa, Tierga (Zaragoza). Autor: Bergminer  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hematites\\_tierga.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hematites_tierga.jpg)

**Smithsonita** – Localidad: Mina Kelly, Distrito Magdalena, Socorro, Nuevo México, EEUU. Autor: Alcinoe.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smithsonite\\_HMNH\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smithsonite_HMNH_1.jpg)

**Figura 28. Hábito cristalino para minerales formados por escamas o laminillas.**

**Clinocloro** – Localidad: Mina Tilly Foster, Nueva York, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clinochlore-usa12c.jpg>

**Biotita** - Localidad: Wannenköpfe, Ochtendung, Región Eifel, Alemania. Autor: Fred Kruijen  
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite\\_aggregate\\_-\\_Ochtendung,\\_Eifel,\\_Germany.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biotite_aggregate_-_Ochtendung,_Eifel,_Germany.jpg)

**Barita** – Localidad: Cerro Warihuyn (Huarihuyun), Miraflores, Perú. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barite-jmix08-17d.jpg>

**Auricalcita** – Localidad: Mina, Chilito, Condado Gila, Arizona, EEUU. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aurichalcite-172362.jpg>

**Figura 29. Otros tipos de hábitos cristalinos.**

**Bornita** - Localidad: No publicada. Autor: Sam Droege.  
<https://www.flickr.com/photos/usgsbiml/9550144642/>

**Malaquita estalactítica** – Localidad: Mina L'Etoile du Congo, República democrática del Congo. Autor: Robert M. Lavinsky  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite-mals03b.jpg>

**Malaquita concéntrica** – Localidad: Katanga Copper Crescent, Katanga (Shaba), República democrática del Congo (Zaire). Autor: Didier Descouens.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite\\_Kolwezi\\_Katanga\\_Congo.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite_Kolwezi_Katanga_Congo.jpg)

**Bauxita** – Localidad: Arkansas, EEUU. Autor: James St. John  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chertified\\_pisolitic\\_bauxite\\_\(wet,\\_cut\\_surface;\\_11.7\\_cm\\_across\)\\_from\\_Arkansas,\\_USA.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chertified_pisolitic_bauxite_(wet,_cut_surface;_11.7_cm_across)_from_Arkansas,_USA.jpg)

**Basalto amigdaloido** – Localidad: El Peñón, Alamedilla,

Granada, Andalucía, España. Autor: Prcantos.  
<https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=93428>

**Geoda de Cuarzo** – Localidad: Desconocida, Colección Alfredo Victoria. Autor: Andrés Omassi.  
<https://sketchfab.com/3d-models/5-geoda-de-cuarzo-facultad-de-ingenieria-unam-6582850ace894e0ca237c4ecfac89e9eb>

**Ágata** – Localidad: Museo de Historia Natural de Carnegie, Pittsburgh, Pennsylvania, EEUU. Autor: James St. John  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agate\\_8\\_\(32375570860\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agate_8_(32375570860).jpg)

**Aragonito olítico** – Localidad: Parque Nacional de las Cavernas de Carlsbad, Nuevo México, EEUU. Autor: Wtucker  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cave\\_Pearls.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cave_Pearls.JPG)

**Figura 30.** *Grados de diafanidad de los minerales.*

**Calcita (Espato de Islandia)** – Localidad: Mina Respina, Poblado de Lillo, León, Castilla y León, España. Autor: Juan María Pérez  
[www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=43643&searchterms=calcita%20islandia&searchauthor=-](http://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=43643&searchterms=calcita%20islandia&searchauthor=-)

**Olivino** - Localidad: Naran-Kagan, Distrito Kohistan, Provincia North-West Frontier, Pakistán. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olivine-gem7-10a.jpg>

**Magnetita** - Localidad: Cerro Huañquino, Potosí Department, Bolivia. Autor: Robert M. Lavinsky.  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-118736.jpg>

**Figura 31.** *Halo pleocroico alrededor de zircón dentro de biotita.*

Zircón dentro de biotita, autor: Strekeisen.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dark\\_crown.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dark_crown.JPG)