

# **HISTORIA DE LA MINERALOGIA**

## **A. del Valle González**

La historia de la Humanidad ha estado unida a los minerales desde el principio. Se sabe que ya en el Paleolítico se usaban determinados minerales para la fabricación de armas y herramientas. Aunque el material preferido era el sílex o pedernal, también se empleaban otras variedades de cuarzo, actinolita fibrosa, granito, ciertos esquistos e, incluso, calizas duras y obsidiana.

También se preparaban las pinturas y pigmentos mediante suspensiones de minerales pulverizados en agua o en aceites. Algunos de los más usados eran hematites, pirolusita, oropimente, cinabrio, malaquita, azurita, etc.

Se sabe que cuando se agotaron los trozos de sílex que se encontraban en la superficie, se empezaron a buscar en el subsuelo, mediante prospecciones. A finales del Paleolítico y durante el Neolítico, ya se practicaban pozos de cierta profundidad y galerías para acceder a los niveles de pedernal que se encontraban entre la creta o entre las calizas eocénicas. Se han encontrado estas minas en diversos lugares de Europa (Francia, Inglaterra, Alemania, Bélgica, etc.) y también en Egipto (Valle del Nilo). En Francia, se sabe que se explotaban unas minas de las que se extraía un sílex amarillento del que se tallaban hojas que, posteriormente, eran enviadas a numerosos lugares de toda Europa Occidental.

También se sabe que determinados minerales eran empleados para adornos en función de su brillo y de sus colores (ágata, turquesa, variscita, cornalina roja, hematites...).

El hallazgo de los metales en estado nativo marcaba un importante hito en la historia de la Humanidad. El uso del oro, la plata y el cobre, debido a sus propiedades, se generalizó para la fabricación de objetos ornamentales y algunos utensilios domésticos. Sin embargo, no podían ser empleados en la fabricación de armas y herramientas. Por eso, un hito más importante lo constituyó el descubrimiento de los metales contenidos en los minerales. Aunque no hay evidencia clara de cómo pudo realizarse tal hallazgo, todo apunta a hechos como los que se citan a continuación. En algún momento pudieron llegar a emplearse rocas con alto contenido en óxidos, carbonatos o sulfuros para la construcción de hogares. Los gases procedentes de la combustión y el carbón fueron capaces de reducir el óxido metálico (también pudieron ser sulfuros) que se encontraban en las rocas del horno. Estos metales (en estado líquido) se irían escurriendo y, posteriormente, depositándose hasta que alguien se diese cuenta de que una masa líquida brillante que al enfriar solidificaba y poseía unas

propiedades útiles, manaba de las piedras. Además de ser muy útil por ser más duro que los metales nativos encontrados hasta ese momento, resultaba más fácil de obtener ya que las piedras que contenían óxidos eran mucho más abundantes que ellos. De esta forma pudieron descubrirse metales tales como el estaño, el plomo y el hierro. Más adelante, se descubrió que el estaño podía mezclarse con el cobre cuando ambos estaban fundidos y que, al enfriar, se formaba un nuevo metal con unas propiedades muy adecuadas para ciertos menesteres. Esto pudo ocurrir hace 7000 años (aproximadamente) y la Humanidad existe desde hace un millón y medio de años.

Hace unos 5000 años, los egipcios y los mesopotámicos practicaban la minería subterránea y extraían minerales que les permitían la preparación de bronce. Sabían que los bronce de mejor calidad correspondían a una proporción de 9 partes de cobre por cada una de estaño, aunque también trabajaban con otras proporciones e, incluso, con otros metales que modificaban ciertas propiedades.

En Egipto se usaron varios minerales con fines médicos, incluyéndose en la composición de brebajes, cataplasmas, enemas, masajes, etc. Algunos de los minerales usados fueron: Alabastro, crisocola (llamada también colirio verde), natrón, cobre, arsénico y galena (colirio negro).

También en Europa se han encontrado restos de fundiciones de bronce (Austria, Alemania, etc.). Se sabe que el estaño ya se obtenía de casiteritas procedentes de Inglaterra. Todo esto debió dar lugar a un activo comercio de minerales y metales por toda Europa.

En diversos lugares de Europa se practicaba la minería de la sal, de la cual se han encontrado importantes vestigios entre los que se incluyen herramientas e, incluso, seres humanos conservados en sal, probablemente a causa de algún derrumbe.

En la Antigua China se obtenía sal evaporando agua salada en cubetas calentadas por gas natural. Hay evidencia de esto a través de pinturas. También en China se explotaban las tierras de caolín para la fabricación de porcelanas. Para los antiguos chinos el oro poseía propiedades sobrenaturales, pues pensaban que quien comía en platos de oro, alcanzaba edades muy avanzadas y quien comía oro, se hacía inmortal.

Hace unos 5000 años, en Mesopotamia se empleaban con gran profusión minerales tales como la malaquita, turquesa, ópalo, lapislázuli, ágata, etc., en la fabricación de ornamentos de diversa índole. Todas estas gemas pudieron llegar procedentes de diversos lugares, dada la situación

estratégica ocupada y el nudo de comunicaciones entre Oriente y Occidente que constituían estas tierras.

En las ruinas de Nínive que datan de hace 4000 a 5000 años y también en Egipto, han aparecido restos de materiales ferrosos, lo cual revela que por entonces ya se practicaba la Siderurgia, aunque parecer ser que eran los sacerdotes quienes realizaban esta tarea. Según descubrimientos recientes, parece probable que sea más antigua la Siderurgia que la Metalurgia del bronce, pero esto no había podido ser comprobado hasta ahora ya que dada su naturaleza, sólo se habían conservado piezas de bronce, mientras que las piezas de hierro, al pasar a limonita, podían haberse perdido. Con métodos actuales de análisis se están detectando elevadas concentraciones de hierro en algunos yacimientos, lo cual revela la posible presencia de piezas de tal metal de antigüedad mayor que algunos bronce.

En China, el tratado sobre Ciencias Naturales más antiguo del que se tiene referencia, es el "Chen Nong Pen ts'ao" y se describen 300 plantas y 46 minerales.

También en la Antigua China se explica la formación de los yacimientos metalíferos en la obra "Huai Nan Tseu". Los soplos de k'i procedentes de diversos lugares generan sustancias que a su vez, a través de mutaciones que duran cientos de años, generan otras sustancias de colores diversos. Entre otras sustancias se mencionan el rejalgam o mercurio amarillo, el oro o metal amarillo, la arsenolita, la plata o el hierro. También se mencionan sustancias cuya naturaleza se desconoce, como el dragón amarillo o el kiue.

Es interesante mencionar que, en China, hacia el año 83 de nuestra era, se dio a conocer la brújula, que se trataba de una especie de cuchara tallada en magnetita que se apoyaba en una placa de bronce bien pulimentado y que se orientaba de norte a Sur.

En tiempos de Demócrito de Abdera (460-370 a.J.C.) se hablaba de la discontinuidad de la materia, de los átomos asociados al "ser de la materia" y del vacío asociado al "no ser de la materia", ocupando los intersticios. La misión del vacío sería permitir el movimiento de los átomos. Como su nombre indica, los átomos serían entidades indivisibles y además son eternas. Los átomos se diferencian unos de otros por el tamaño y por la posición relativa en cada cuerpo. Hay que tener en cuenta que, para los griegos de esta época, la experimentación no tenía mucho valor y basaban sus conocimientos científicos en los razonamientos teóricos, lo cual impidió un mayor desarrollo de la Ciencia.

La Historia escrita de la Mineralogía en Occidente comienza con los filósofos griegos Aristóteles (384-322 a.J.C.) y Teofrasto de Efeso (378-287 a.J.C.). Aristóteles, en su "Tratado de las Piedras", esbozó una clasificación en la que ya se distinguían los minerales metálicos de los no metálicos y en estos últimos diferenciaba las piedras y las tierras. Teofrasto (discípulo de Aristóteles), hacia en año 315 a. J. C., escribió sus obras "De los Metales" y "De las Piedras". De la primera no se conserva nada, pero de la segunda se conserva una buena parte, en la que se describen 60 minerales y rocas, así como sus diversas aplicaciones. Se habla del cinabrio, de su relación con el mercurio y de su uso como colorante. También se habla de las propiedades que poseía el polvo de amatista para evitar la embriaguez cuando se tomaba antes de ingerir alcohol. Del cristal de roca comenta Teofrasto que podía ser un hielo tan enfriado que nunca se podía volver a fundir, siendo eficaz como amuleto contra el dolor de muelas. Teofrasto hace varios comentarios sobre las formas geométricas de algunos minerales.

En Roma, Plinio el Viejo (23-79) escribió la "Historia Natural" en la que describe el reino mineral y hace un estudio de las formas geométricas que aparecen en los cristales de cuarzo. Plinio pereció en Pompeya, cuando acudió para estudiar la erupción del Vesubio. Durante el Imperio Romano se explotaron innumerables minas que suministraron la materia prima para los hornos que, ya bastante sofisticados, poseían los romanos. Los metales que salían de estos hornos eran fundamentalmente hierro, cobre y bronce. Así, se inundó el Imperio de piezas metálicas de todo tipo (clavos, fíbulas, etc.). Pero también se empleaban ya otros metales. El plomo fue empleado con cierta profusión para la fabricación de las cañerías que se instalaron en Roma. Una buena parte de ese plomo fue extraído de la galenas de la zona Bética. También de las galenas argentíferas extraían la plata y preparaban pigmentos (albayalde y cerusa). Con el plomo también fabricaban anclas (cosa que ya empezaron a hacer los fenicios cuando explotaron el plomo de Andalucía), así como las grapas y abrazaderas que empleaban en la fabricación de recipientes de madera (como, por ejemplo, las barricas de vino). Más adelante, en la Edad Media, se emplearían los minerales de plomo en la fabricación de barnices, pinturas y vidrios.

Con la caída del Imperio Romano, los conocimientos que se poseían quedaron prácticamente olvidados. En muchos lugares de Europa la minería se abandonó totalmente y los metales comenzaron a escasear (fue, en muchos aspectos, como una vuelta al Neolítico). Sólo en contados y muy determinados lugares del continente, se continuó con la actividad minera y metalúrgica y, fundamentalmente, con fines militares. Pero en otras zonas del mundo las actividades minero-metalúrgicas se seguían practicando (China, India, Damasco..).

Durante la baja Edad Media, con el auge de la Alquimia, se atribuyó a algunos minerales ciertas propiedades mágicas. Así, se suponía que el

crystal de roca prevenía la sed y con este mineral se empezaron a fabricar recipientes para el agua. Otro mineral, la serpentina, se empleaba contra las mordeduras de animales peligrosos. También se atribuía al topacio la propiedad de curar la tristeza al ser añadido al vino.

Hacia el año 600, San Isidoro de Sevilla (560-636) recopiló datos sobre numerosos minerales y metales. Estudió las propiedades del hierro, indicando la existencia de varias clases de metal dependiendo del tipo de tierras de las que se extraiga. Había hierros blandos, hierros duros, hierros frágiles, hierros que creaban fácilmente orín (óxidos hidratados de hierro), hierro ornamental, etc. Estas diferencias estaban marcadas por las impurezas que poseía el mineral en su origen y por el tratamiento metalúrgico que había recibido. San Isidoro hace mención a la forma geométrica de algunos cristales como el cuarzo y la esmeralda.

Durante la Baja Edad Media florece la Alquimia, cuyos comienzos se sitúan en el mundo árabe, como una recopilación y desarrollo de los conocimientos científicos procedentes del antiguo Egipto y de la escuela filosófica de Alejandría. Posteriormente, se difundiría por Europa. Los alquimistas consideran la materia formada por tres principios comunes, el mercurio (el carácter metálico y la volatilidad), el azufre (la combustibilidad) y las sales (la solubilidad y la solidez). La transmutación de los metales sería la principal preocupación de los alquimistas. Para ello había que contar con la "piedra filosofal", cuya preparación constituía el objetivo de la Alquimia. Más adelante se intentaría obtener el "elixir de la larga vida" o "elixir filosofal", cuya misión sería eliminar las enfermedades, prolongar la juventud y alcanzar la inmortalidad. La Alquimia no estaba bien vista por la Religión y hubo de desarrollar gran parte de sus actividades en secreto. El "Liber Mutus" era un libro de Alquimia que "enseñaba" la preparación de la "piedra filosofal" sólo con imágenes poco clarificadoras (era un libro para "entendidos"). No es necesario decir que la Alquimia nunca logró sus propósitos. Sin embargo, los métodos y aparatos utilizados por los alquimistas supusieron avances en el desarrollo de la Ciencia.

Hacia el año 1000, Al-Biruni (973-1048) calculó la densidad de varios minerales. También encontró inclusiones líquidas en algunos cristales, suponiéndose que eran restos del material del que se había formado.

En esta época, Avicena (980-1037) estableció la primera clasificación conocida de rocas y minerales (la clasificación de Aristóteles se había perdido) que figura en su "Tratado de las Piedras":

**METALES:** Los minerales, de cuya fusión se extraen los metales. Aquí también se incluyen las gemas.

COMBUSTIBLES: También llamados fósiles o azufres. Incluye, fundamentalmente, al carbón y a otros combustibles.

SALES: Minerales que se pueden disolver en agua.

PIEDRAS Y TIERRAS: El resto de los minerales no incluidos en los apartados anteriores. Son infusibles.

Esta clasificación relacionaba muchas piedras preciosas con algún metal. Por ejemplo, relacionaba el corindón con el oro. Pero esta relación se basaba fundamentalmente en ideas místicas e, incluso, mágicas, dejando patente como las creencias sobrenaturales podían mezclarse con las ideas científicas, lo cual es un hecho característico de muchos pueblos no sólo en la Edad Media sino también en épocas más cercanas.

Junto a esta clasificación, se realizaron descripciones más o menos centradas en el color, al que se comparó continuamente con objetos, naturales o artificiales, ajenos a los minerales. Se habló del color aceituna, color rosa, color paja, color col, etc. También se describieron otras propiedades como el brillo, la diafanidad, la densidad e, incluso, algunas características magnéticas en el caso de la piedra imán o magnetita. También se intentó describir algún efecto óptico relacionado con los minerales. Del cuarzo hialino (al que llamaban bulur) decían que era capaz de incendiar el algodón o un trozo de tela negra cuando se colocaba a los rayos del sol.

Poco antes del año 1000 (alrededor del 990), y coincidiendo con el Sacro Imperio Romano Germánico, la Metalurgia y la Minería europeas comenzaron a renacer y a tomar un auge comparable al de la época romana. Se construyeron hornos grandes y eficaces en los que se fundieron bronce de calidad empleados en la fabricación de las campanas de las numerosas catedrales que se construyeron por toda Europa a partir del año 1000.

Durante el reinado de Alfonso X el Sabio (1221-1284) se escribió el "Lapidario" en el que se mencionaron hasta 360 piedras y donde eran descritas con gran amplitud 280. Se describían de ellas, sus propiedades físicas y sus virtudes curativas.

En el año 1260, el dominico alemán San Alberto Magno (1193-1280) describió, en su obra "De Mineralibus", 75 piedras, relatando en ellas sus características más importantes y describiendo algunas de sus formas cristalinas, como por ejemplo, el octaedro del diamante. También mencionaba las propiedades medicinales que poseían algunas de ellas. San Alberto Magno sostenía la idea de que los metales verdaderos sólo

podían engendrarse por la sublimación de los principios húmedos y de los principios secos. Otras aportaciones de San Alberto Magno a la Química y a la Mineralogía son las siguientes:

Caracterización del cinabrio.

Preparación de cerusita y de minio en el laboratorio.

Descripción de la acción de los ácidos sobre metales y minerales, así como su uso para la separación del oro y la plata en aleaciones.

Obtención de potasa a partir de la cal.

Estudio del proceso de calentamiento del azufre.

Descripción diversas operaciones de laboratorio como molienda, destilación, disolución, cementación, etc.

Establecimiento del concepto de "afinidad" como la tendencia a reaccionar entre dos o más entidades químicas.

En su obra "*De Alchimia*", San Alberto Magno expone sus ideas sobre los conocimientos y comportamiento que deben tener los alquimistas.

San Alberto Magno hizo aportaciones a otras ramas de la Ciencia, como la Zoología, con su obra "*De Animalibus*" (26 tomos), donde describe numerosas especies, alguna extinguida ya, y estudia numerosos tejidos animales. A la Botánica aporta la obra "*De vegetalibus aut plantis*", en donde realiza una clasificación de los vegetales, expone consideraciones fisiológicas diversas y da consejos de utilidad en Agricultura como, por ejemplo, métodos de vinificación y nociones de Edafología. Por toda su obra San Alberto Magno está considerado como el Doctor Universal

Unos años antes, el dominico Tomás de Cantimpré (1200-1280), en los tomos XIV y XV de su enciclopedia "*De Naturis Rerum*", hizo un estudio de las piedras y de los metales respectivamente.

A partir del año 1300, se instalaron grandes centros metalúrgicos cerca de los grandes ríos, que suministraban energía hidráulica para las soplantes de las forjas. En las orillas del río Rhin aparecieron los primeros altos hornos en Siegerland y Franconia los cuales, gracias a las soplantes, podían alcanzar las temperaturas necesarias para la fusión. De esta forma se volvió a alcanzar el nivel que mil años antes habían tenido los romanos.

A partir del siglo XIV, se empezó a extender el uso del hierro y se fabricaron con él numerosos útiles, herramientas, armas, adornos, etc.

Durante el siglo XV, adquiere gran relevancia la minería del hierro en España, instalándose en Cataluña y en el País Vasco hasta 500 forjas que venden productos de gran calidad a varios países de Europa.

Al finalizar la Edad Media había una gran confusión en lo que respecta a las Ciencias Naturales. Aunque se consideraba la existencia de 3 Reinos en la Naturaleza (Animal, Vegetal y Mineral), había numerosas entidades que no se habían conseguido ubicar (las esponjas se consideraban intermedias entre vegetales y animales) o se ubicaron de forma errónea (las perlas se consideraban minerales, el coral se consideraba una piedra formada por plantas congeladas, etc.). El origen de esta confusión pudo estar en la gran variedad de datos que se habían ido recopilando, en su mayoría procedentes de tratados antiguos que en buena parte se encontraban incompletos y que no aportaban muchas explicaciones sobre etimologías y procedencias de los materiales tratados en ellos. Esto se intentó completar con suposiciones no siempre acertadas.

Ante este panorama se imponía desarrollar una clasificación y una nomenclatura mineral, la cual puede resumirse como se muestra a continuación:

### 1.- TIERRAS

Son materiales que no se forman por exhalaciones ni se subliman por la acción del fuego. Se incluyen aquí arenas, margas, arcillas, creta, etc.

### 2.- ROCAS MASIVAS

Son las rocas que pueden tener formas y aspectos muy variados.

### 3.- VENAS Y FILONES

Según Agrícola (George Bauer, 1494-1555), los elementos minerales rellenan huecos y grietas en las rocas preexistentes. En la formación de estos materiales tiene gran importancia el agua, como lo prueba (según Agrícola y otros autores antiguos), la enhidra o piedra de agua. B. Palissy (1510-1589) habla de las "aguas congelativas" las cuales se encargan de precipitar y endurecer los productos que se encuentran disueltos. Los minerales transparentes (cristal de roca, etc.) son una prueba de ello, pues se consideran productos de congelación. En esta época no se conocía la cristalización, toda solidificación se consideraba una congelación, del mismo modo que el hielo se forma por la congelación del agua.



#### 4.- SALES

Se incluyen aquí una serie de materiales con diversos orígenes. Recordemos que, por ejemplo, la sal común se obtenía desde tiempos antiguos, tanto del agua del mar, como de las minas del Centro de Europa y otras zonas. Se incluyen también aquí el nitrógeno, el natrón (abundante en la zona de Egipto y del Sinaí) y el bórax (denominado tinkar por los árabes). Sin embargo, había gran confusión con algunas de las sales.

#### 5.- GEMAS

Había una amplia información bibliográfica sobre estos materiales. Se conocían descripciones de diversas joyas de la Época Antigua y también de las propiedades mágicas de muchas de ellas. Además, se publicaron numerosos trabajos sobre estos temas. Sólo en Francia, durante el siglo XVI se pueden mencionar los trabajos siguientes:

"Blasons domestiques" (Gilles Corrozet, 1539)

"Blason des pierres précieuses" (Jean de la Taille, 1572)

"Amours et nouveaux échanges des pierres précieuses"  
(Rémy Belleau, 1576)

Este último autor afirma que las turquesas cambian de color cuando se colocan junto a una persona con fiebre. Recordemos que, en tiempos más antiguos, se había comentado de la turquesa que si era portada por una mujer entre sus adornos y ésta era infiel al marido, se producía un cambio de color. Actualmente se sabe que, al igual que un gran número de minerales, los cambios de temperatura y de humedad provocan esos cambios de color.

#### 6.- METALES. METALOGENESIS.

Desde la Antigüedad se habían relacionado los cuerpos celestes con los metales, cosa que había seguido haciendo la Alquimia: Oro-Sol, Plata-Luna, Estaño-Júpiter, Cobre-Venus, Hierro-Marte, Mercurio-Mercurio, Plomo-Saturno (saturnismo o cólico saturnino es una intoxicación con plomo).

Paracelso (Ph. A. Teophrastus Bombast von Hohenheim, 1493-1541) dividió los metales en dos clases:

Metales perfectos: Oro y plata.

Metales imperfectos: Hierro, cobre, plomo y estaño.

Posteriormente se añadiría el antimonio.

Pero algunos autores se opusieron a esta clasificación. J. Aubert consideraba que cada metal estaba creado por Dios para una misión y, por lo tanto, era perfecto en sí mismo.

En esta época aumentan las críticas a la crisopoyesis y se recuperan las líneas del racionalismo aristotélico que habían defendido San Alberto Magno y Santo Tomás de Aquino. Aristóteles basaba el Universo en la combinación de las entidades físicas con las cualidades de la materia para generar los 4 elementos del mundo:

El fuego es cálido y seco.  
El agua es frío y húmedo.  
El aire es cálido y húmedo.  
La tierra es fría y seca.

Los metales se generan a partir de los vapores que emanan del interior de la tierra, los cuales se introducen en huecos y fisuras en donde se van espesando y endureciendo hasta formarse cada metal.

El florecimiento de la industria minera se refleja en la gran cantidad de libros y tratados sobre minerales, minería y metalurgia, algunos de los cuales son los siguientes:

*"La Pirotechnia"* (1540), Vannoccio Biringuccio de Siena.  
*"De Re Metalica"* (1551), Christoph Entzel (Encelius).  
*"De Natura Fossilium"* (1554-55) y *"De Re Metalica"* (1556), Agricola.  
*"De Re Metalica"* (1569), Bernardo Pérez de Vargas.

Agrícola describe de los minerales su color, brillo, dureza, transparencia, solubilidad, densidad, formas geométricas, fusibilidad, fractura y algunas características específicas. También hace descripciones sobre procesos metalúrgicos y sobre los metales.

En 1572, se publica en Valladolid la obra "Quilatador de plata, oro y piedras" de J. de Arfe de Villafañe, un trabajo que pone de manifiesto la buena situación de la Metalurgia en España durante este siglo.

Hacia 1583 Lazarus Ercker (discípulo de Agricola) publica un tratado sobre análisis de minerales donde se incluyen métodos para localizar depósitos minerales con el uso de la brújula y se deshechan todos los métodos mágicos.

Sin embargo, aún se admite la existencia de poderes ocultos procedentes del interior de la tierra que influyen sobre los fenómenos y a los que se recurre cuando la Química y la Física no dan explicación.

Otro hecho importante en esta época es el progresivo abandono del latín para las publicaciones técnicas y científicas y el empleo de las lenguas al uso.

Durante el siglo XVI se inventan la hojalata y el estañado de las planchas de hierro. El invento de la imprenta daría gran auge a la Minería y a la Metalurgia del Plomo durante este siglo y también durante el siglo XVII.

Hacia 1555, el español Bartolomé de Medina pone a punto las técnicas de amalgamación que se emplearán en las minas de oro y plata de América.

En China, durante el siglo XVI, se publica un libro titulado "Pen T'sao Kang Mu", en el que el autor (Li-Che-Tchen) describe 217 minerales.

En el siglo XVII la Mineralogía se configura, en cuanto a la metodología, como un compendio de ciencias matemáticas, físicas, químicas y naturales. Se compone de varias ramas:

**CRISTALOGRAFIA:** Se considera la parte más pura de la Mineralogía y estudia las propiedades relacionadas con la simetría

**MINERALOGIA QUIMICA:** Estudia la composición química de los minerales.

**PETROGRAFIA:** Describe los minerales, sus asociaciones (rocas), su origen y su situación en la Naturaleza.

Hay que indicar que, en todo momento, la Mineralogía aparece separada de la Geología y los minerales constituyen por sí mismos uno de los tres reinos de la Naturaleza. Durante este siglo dieron empuje a la Mineralogía las investigaciones de Descartes, Hooke, Leeuwenhoek, Boyle, Stenon y otros.

En 1609, el belga Anselmo Boecio de Boodt (1550-1632) que se encontraba en Bohemia al servicio del emperador Rodolfo II desde 1604, publica la obra "Historia gemmarum et lapidarum". En esta obra trata un total de 647 piedras preciosas, minerales y rocas, describiendo sus propiedades, yacimientos y usos. Hace especial hincapié en las propiedades físicas. Por ejemplo, en la dureza distingue 5 grados:

- Piedras endurecidas
- Piedras blandas
- Piedras duras atacables por las limas
- Piedras que tienen que trabajarse con el esmeril
- Piedras que sólo se pueden trabajar con el diamante

Describía también algunas propiedades ópticas de varias gemas y estudia las variedades del cuarzo atendiendo al color. También estudió las propiedades terapéuticas de ciertas piedras preciosas. Esta obra se tradujo al francés en 1644, con el título: "*Le parfait joaillier, ou Histoire des Pierreries*".

En 1611, J. Kepler (1571-1630) hace una descripción de la disposición hexagonal de los cristales de hielo en los copos de nieve. Diferencia entre el empaquetamiento hexagonal compacto y el cúbico compacto. Más adelante estos estudios fueron completados por R. Hooke (1635-1705).

En 1623, Comeldon diseña un tratamiento de galenas, con carbón de hulla, que permite obtener grandes cantidades de plomo.

En 1640, el párroco de Potosí, A. Alonso Barba publica el libro "El Arte de los Metales...", en donde se exponen los métodos de amalgamación en caliente y otras técnicas metalúrgicas. Este libro constituyó una obra de consulta hasta el año 1800.

En 1661, R. Boyle (1627-1691) publica la obra "El Químico Escéptico", en la que se exponen la idea del elemento químico y la Teoría Atómica para la explicación de numerosos hechos de la Química. Se puede decir que con esta obra Boyle acaba con la Alquimia, aunque no desecha totalmente la posibilidad de transmutar los metales. Otras aportaciones de Boyle a la Física y a la Química son sus trabajos sobre los gases (incluidos los métodos de determinación de los mismos y el estudio de los procesos de oxidación por el aire) y los métodos de caracterización de mezclas y combinaciones con determinados reactivos.

En 1669, el físico danés Niels Steensen (Nicolás Stenon, 1638-1686), publica la obra "De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus" (Florenia, 1669) en la que se plasma un importante hallazgo

que abre el camino al conocimiento de las estructuras cristalinas. Utilizando el goniómetro comprueba los ángulos de las caras de los cristales de cuarzo de diversas procedencias, llegando a la conclusión de que, independientemente del origen, todos los ángulos se repiten de un cristal a otro. De esta forma, se comprueba por vez primera la "Constancia de los ángulos diedros". Kepler había observado también la constancia de los ángulos diedros de otros minerales. Stenon descubrió también las inclusiones fluidas en los cristales.

En 1670, el danés Erasmo Bartholinus (1625-1698) descubre la doble refracción en el Espato de Islandia, que explica en su trabajo "Experimenta crystalli Islandici disdiacastici, quibus mira et insolita refractio detegitur".

En 1672, Huygens (1629-1695) observa como se polariza un rayo luminoso en un cristal de Espato de Islandia. En 1690, Huygens explica en el "Tratado de la Luz" las propiedades ópticas del cuarzo y de la calcita, apuntando la idea de que sus estructuras están formadas por distribuciones regulares de corpúsculos que forman una red romboédrica.

Las sales constituyen el principal objeto de estudio para los químicos del siglo XVII, al igual que los metales lo fueron durante el siglo XVI y los sulfuros durante la Edad Media. El punto de partida de la química de las sales estuvo en el estudio de la deflagración de la pólvora negra o del salitre. En esta época aumenta considerablemente el número de químicos y se suceden los descubrimientos.

A finales del siglo XVII, el número de minerales conocidos es próximo a 300.

Durante el Siglo XVII se empiezan a montar Museos de Ciencias Naturales basados en colecciones privadas. El país pionero en este tema es Italia, habiéndose establecido la primera colección en el Vaticano a finales del siglo XVI, durante el papado de Sixto V. También se deben mencionar las colecciones de Aldrovandi en Bolonia y el Calceolarius de Verona. En Inglaterra también se crearon varias colecciones. En 1664 la Royal Society (fundada en 1660) se hizo cargo de la colección de Robert Hubert. La creación del Museo Británico de Historia Natural fue idea de Robert Hooke, aunque su verdadero fundador fue Sir Hans Sloane, quién legó sus colecciones.

Durante los siglos XVII y XVIII, se empiezan a preparar aleaciones adecuadas para determinados usos. En 1718, Sthal indica la preparativa del latón mezclando cobre con calaminas, aunque todavía pasarían algunos años antes de que se pudiera obtener el cinc metálico más o menos puro. Respecto al cinc, hay que decir que ya fue conocido por los griegos y los

romanos, como así lo revelan escritos de Aristóteles, Platón, Homero y Plinio. Incluso, se han encontrado ídolos hechos de latón en Tracia. Además, los minerales de cinc fueron empleados por ciertas propiedades curativas (son antisépticos) desde varios siglos antes de nuestra era. En China y en la India se usaba cinc metálico, el cual fue traído por primera vez a Europa Occidental durante el siglo XVII, siendo denominado entonces "Estaño de Indias" o "tutanego". La palabra cinc ya había sido usada por Paracelso. La obtención del cinc metálico se realiza por primera vez en Europa en el año 1730, cuando Lawson se hace con las fórmulas preparativas empleadas en Oriente. Posteriormente, Champion, en 1743, y Ruhberg, en 1798, introducen importantes mejoras en la Metalurgia del Cinc.

En 1728, Geoffroy el Viejo (1672-1731) estudió las composiciones de los sulfatos de hierro y de los alumbres. También estudiaron los alumbres A.S. Margraff (1709-1782) y N.L. Vauquelin (1763-1829).

El químico ruso M. Lomonosov (1711-1765), escribe tratados sobre minerales y enuncia una clasificación basada en criterios físico-químicos, proponiendo los grupos siguientes:

- Metales
- Semimetales
- Combustibles (carbones y petróleos)
- Sales
- Piedras y tierras
- Menas
- Piedras preciosas
- Piedras medicinales

En 1745, M. Lomonosov publica un catálogo de formas cristalinas de minerales, señalando la Constancia de los Angulos Diedros en ciertos cristales, aunque su trabajo no trascendió a Europa Occidental. Lomonosov realizó importantes investigaciones en diversos campos de la Física y la Química, entre los que destacaremos la Química Analítica. También formula teorías sobre la formación de los yacimientos minerales, relacionándolos con los terremotos.

También en Rusia, V.M. Severguin (1765-1826) elabora los principios del análisis de minerales y metales. En este campo hay que mencionar también a T. Bergman (1735-1784), en Suecia, y a L.J. Thénard (1777-1857), en Francia.

A.F. Cronstedt (1722-1765) considera que las sustancias orgánicas no deben ser estudiadas por la Mineralogía y desarrolla métodos para el análisis de minerales entre los que deben mencionarse los ensayos con

soplete. El mismo Cronstedt, en 1758, propone una clasificación mineral basada en criterios químicos, aunque también tuvo en cuenta ciertos caracteres morfológicos. Esta clasificación se expone en una obra que se tradujo al castellano durante 1783, pero que no se llegó a publicar.

En 1747, P.J. Macquer (1718-1784) encontró la composición del yeso. También en esta época, A.S. Margraff (1709-1782) estudia el espato pesado o baritina llegando a la conclusión de que no contenía calcio, en contra de quienes opinaban que se trataba de un tipo de yeso. Sin embargo, la baritina fue caracterizada por K. Scheele (1742-1786). También Margraff trabajó sobre la obtención del fósforo y del ácido fosfórico a partir de la fosforita y estudio los elementos alcalinos por la coloración a la llama.

En 1748, el español Antonio de Ulloa descubre el platino. Este metal, denominado entonces platina como despectivo de la plata, se utilizaba en América para adulterar el oro. Para evitar este hecho, el Gobierno español hizo arrojar al mar grandes cantidades de este metal. El precio aproximado del platino en aquella época era de 25 pts. el kilogramo.

Hacia 1768, C. Linneo (1707-1778) publica, en Francia, su obra "Sistema de la Naturaleza", en la que aplica a los minerales una nomenclatura doble (género y especie), como ya había propuesto para animales y plantas. Linneo llega a afirmar que los minerales que tienen la misma forma poseen composiciones similares.

En 1772, J. B. Rome de l'Isle (1736-1790) organiza los conocimientos cristalográficos de la época en su obra "*Essai de Cristallographie*". En esta obra se relaciona la Cristalografía con la Mineralogía y con la Litología. En 1783, Rome de l'Isle y A. Carengot (1742-1806), comprueban empíricamente la Ley de la Constancia de los Angulos Diedros en los cristales de una misma especie. En 1780, A. Carengot había inventado un goniómetro de contacto que permitía medir ángulos entre caras de cristales y deducir sus elementos de simetría.

Frente a las ideas de Rome de l'Isle se enfrentan las de Buffon (G.L. Leclert de Buffon, 1707-1788) quién resta importancia a las formas cristalinas dándosela a las propiedades físicas. Por otro lado Buffon hizo numerosos aportes a la Historia Natural, sobre la cual escribió un importante tratado. Realizó numerosas hipótesis sobre la naturaleza de diversos procesos geológicos como terremotos y volcanes. Incluso explicó el origen del Sistema Solar como resultado del choque de un cometa con el Sol. Evaluó la edad de la Tierra calentando esferas de silicatos y dejándolas enfriar. Sintetizó nuevos minerales por calentamiento de arcillas a elevadas temperaturas.

La idea de Especie Mineral no se encuentra aún muy desarrollada, aunque sí que se podía hablar de este concepto desde un punto de vista químico, ya que un mineral es un compuesto químico de naturaleza inorgánica.

Durante el siglo XVIII se van mejorando los microscopios y hacia 1782, L. Daubenton (1716-1800) estudia los agregados dendríticos, aclarando su naturaleza. Otros trabajos microscópicos fueron realizados en 1794 por D. Dolomieu (1750-1810) y en 1800 por L.B. Fleuriau de Bellavue (1761-1852).

En 1765, la Enciclopedia de Diderot y D'Alembert define la Mineralogía del modo siguiente:

*La Mineralogía es la parte de la Historia Natural que estudia las sustancias del reino mineral (piedras, sales, combustibles,...), es decir, los cuerpos inanimados. Se incluyen también los conocimientos de la Minería y de la Metalurgia.*

Además, la Enciclopedia matiza que para un buen conocimiento de estos materiales es necesario estudiarlos "in situ", acudiendo a los lugares de la Tierra donde se encuentran, es decir, se requiere el contacto con la Naturaleza.

En 1766, se constituye la Escuela de Mineralogía de Freiberg. En 1775 A.G. Werner (1740-1817) comienza a impartir la Mineralogía. Asistieron a esta Escuela conocidos mineralogistas como J. Breithaupt y Lomonosov. En 1795, Werner publica, en Dresde, un tratado de Mineralogía en el que se describen las características de los minerales con una visión claramente científica. Werner también estudió métodos para la determinación de minerales y propuso clasificaciones en las que predominaba el criterio químico, pero con ciertas matizaciones sobre las propiedades físicas y la morfología. Consideró la Mineralogía una disciplina aparte de la Geología (en la que incluyó la Paleontología). Para Werner la Cristalografía y la Mineralogía Determinativa formaban parte de la Mineralogía Descriptiva. Por otro lado Werner realizó grandes aportaciones a la Geología, como la teoría de formación de los minerales.

Se puede afirmar que la Mineralogía moderna nace en 1770, cuando René Just Haüy (1743-1822), que era botánico, quiso relacionar el concepto de Especie Botánica con el de Especie Mineral, dando a la morfología cristalina la misma importancia que a la composición química. Define la Especie Mineral en los términos siguientes: *"Especie Mineral es un conjunto de cuerpos cuyas moléculas integrantes son semejantes por sus formas y están compuestos por los mismos principios unidos por la misma razón"*.



Posteriormente realiza una clasificación, en base a la estructura, en la que establecen 5 clases minerales:

- Pétreos y salinos
- Combustibles no metálicos
- Metales
- Igneos
- Volcánicos

Hacia 1781, Haüy se da cuenta de que la calcita siempre se rompe formando romboedros y que esta forma se conserva por pequeños que sean los cristales. Esto le llevó a suponer que esta forma se conservaría hasta el nivel atómico y que debía existir la misma disposición por parte de los átomos que constituyen el carbonato cálcico. En sentido inverso, también podrían ser construidos cristales de calcita con aspectos diversos si se juntaban los trozos que se habían obtenido como consecuencia de la partición. Esto explicaría el gran número de hábitos existentes en la calcita. En general, Haüy consideraba que un cristal es un sistema de pequeños poliedros, todos iguales, llamados moléculas integrantes que se unían por las caras y cuya forma se determinaba mediante los planos de exfoliación o por formas secundarias que derivan de la principal según determinadas leyes. Quedaban definidos así los planos de exfoliación. Como consecuencia de todo esto enuncia la Segunda Ley de la Cristalografía: "Cada forma cristalina tiene su red".

Las ideas de Haüy fueron plasmadas en varias obras, entre las que destacan:

*"Essai d'une theorie sur la structure des cristaux appliquée à plusieurs genres de substances cristallisées"* (1784).

*"Traité de Mineralogie"* (5 volúmenes) (1801).

*"Traité de Cristallographie"* (3 volúmenes) (1822).

En el *"Traité de Mineralogie"* se expone una clasificación química de minerales.

Hay que decir que anteriormente, el sueco T. Bergman ya había hecho consideraciones geométricas sobre la relación entre las formas de los cristales de calcita (escalenoedros, romboedros, prismas,...). Aunque este autor considera poco importantes las formas cristalinas a la hora de realizar una clasificación mineral, dando más importancia a los aspectos químicos.

Por tanto, al empezar el siglo XIX, ya está introducido el concepto de hábito, tanto por Werner como por Haüy. En consecuencia, se empiezan a realizar clasificaciones de los cristales y de las formas cristalinas.

Durante el siglo XVIII, coincidiendo con el invento de la máquina de vapor, la Metalurgia, sobre todo la del hierro, atraviesa una importante etapa de auge. Se empieza a necesitar grandes cantidades de hierro y de acero, lo cual impulsa la Minería y la Mineralogía de yacimientos. También se hace necesario ampliar la capacidad y el rendimiento de los hornos. En 1722, Réaumur emplea el coque para la fabricación del arrabio y estudia los procesos de carburación y de conversión del hierro en acero. En 1767, se inaugura el primer alto horno en Europa que pasa por diversas dificultades de funcionamiento. En 1780, después de numerosos fracasos en toda Europa, Cort patenta el primer alto horno de afino. Hacia 1850, funcionaron en Inglaterra alrededor de 150 altos hornos. Al mismo tiempo, en España se empieza a derrumbar la industria siderúrgica al no poder competir en calidad con las potencias europeas.

En 1783, los hermanos Juan José (1753-1804) y Fausto (1755-1833) Elhuyar Lubice aislan, en Vergara, el wolframio a partir de unas wolframitas. Este hallazgo se produce después de que Juan José observara que K. Scheele, en Suecia, había obtenido el ácido tungsténico, pero no había podido obtener el elemento wolframio.

En 1786, L. J. Proust (1754-1826) descubre, en el Laboratorio de Química de la Academia de Artillería de Segovia, la Ley de las Proporciones Definidas.

En 1787, A. L. Lavoisier (1743-1794), junto con otros científicos publica la obra "Método de Nomenclatura Química", en donde se sistematizan los nombres de las sustancias en función de su composición. Como ejemplo, se abandona el nombre de aceite de vitriolo para llamarle ácido sulfúrico.

En 1789, aparece la primera revista dedicada de forma monográfica a la Química, "Annales de Chimie".

En 1799, aparece el primer número de los Anales de Historia Natural, publicados por el Real Gabinete de Historia Natural que se creó en 1771.

En 1800, A. Volta (1745-1827) inventa la pila eléctrica y pone los pilares de la Electroquímica, lo cual condujo al descubrimiento de numerosos elementos alcalinos, alcalino-térreos y halógenos.

En 1801, Andrés Manuel del Río (1764-1849) descubre el elemento Vanadio, al que llamaría *pancromo* por la diversidad de colores que generan sus compuestos. También se empleó el nombre de *eritronio* para este elemento, debido a que forma unas sales blancas con los alcalinos y los alcalinos-térreos que pasan a color rojo escarlata al ser calentadas o al ser tratadas con ácidos. El hallazgo se produjo a partir de una vanadinita

procedente de la mina La Purísima, de Zimapán (México). Por desgracia para del Río, sus investigaciones no fueron tomadas en serio en Europa y debió compartir su descubrimiento con el sueco A.G. Sefström quien redescubrió el vanadio en 1830. Afortunadamente, unos años más tarde J. Berzelius proclamó el hallazgo de A.M. del Río.

En 1809, el inglés W. H. Wollaston (1766-1828) utilizó un goniómetro monocircular de reflexión para medir cristales. Los resultados obtenidos fueron bastante precisos.

En 1815, el ingeniero de minas francés P. L. A. Cordier (1777-1861) observa al microscopio minerales sumergidos en líquidos, lo cual permite conocer varias propiedades ópticas de los cristales (métodos de inmersión). Cordier publicó, en 1830, la obra "*Clasificación metódica de las rocas*", en donde realiza consideraciones sobre el origen de las rocas ígneas y sedimentarias.

En 1818, Malus define la luz polarizada y entre 1830 y 1841, el escocés W. Nicol construye el microscopio polarizante, importante avance que permite constatar las propiedades ópticas de muchos cristales.

J. Berzelius (1779-1848) estudia químicamente los minerales y propone, en 1819, la primera clasificación puramente química, que Dana se encargaría de perfeccionar en 1854.

En 1820, Mohs (discípulo de Werner) establece la escala de dureza, basada en 10 minerales tipo.

En 1828, F. Wöhler (discípulo de Berzelius) sintetiza urea en el laboratorio, siendo la primera sustancia orgánica que se prepara fuera de un ser vivo. Este experimento levantó bastantes polémicas y marcó el inicio de la Química Orgánica.

En 1830, Hessel establece las 32 Clases de Simetría y las relaciona con las formas externas de los cristales.

A principios del siglo XIX, ya está introducido el concepto de hábito, tanto por Werner, como por Haüy, y se empiezan a realizar clasificaciones de los cristales por sus formas y sistemas cristalinos. Eilhard Mitscherlich observa que hay minerales que cristalizan en formas idénticas aunque tengan diferente composición química. Estudia la serie apatito, piromorfita, vanadinita, mimetesita, y también, la serie eritrina, annabergita, vivianita. Sin embargo, al hacer un cuidadoso análisis químico, ve como las fórmulas, aunque formadas por diferentes elementos, son semejantes. Denomina a este fenómeno isomorfismo. También estudia el caso de minerales con la misma composición química pero con diferente forma cristalina, como la

calcita y el aragonito (o el grafito y el diamante), estableciendo el concepto de polimorfismo.

Durante los siglos XVIII y XIX se descubren y caracterizan numerosos elementos metálicos que, si bien en su mayor parte eran conocidos en forma de sales u otros compuestos, no habían podido ser identificados o aislados como tales elementos.

<b>ELEMENTO</b>	<b>DESCUBRIDOR(ES)</b>	<b>AÑO</b>
Cobalto	G. Brandt	1735
Níquel	A. Cronstedt	1741
Aluminio	A. Marggraf	1754
	H. Oersted	1825
	F. Wöhler	1827
	S.C. Deville y Bunsen	1854
Platino	A. de Ulloa	1748
Wolframio	Hermanos Elhuyar	1773
	K. Scheele	1782
Manganeso	K. Scheele	1774
Bario	K. Scheele	1774
	H. Hahn	1774
Molibdeno	K. Scheele	1778
	P.J. Hjelm	1782
Zirconio	M. Klaproth	1789
	A. Guyton	1789
	J. Berzelius	1824
Uranio	M. Klaproth	1789
Estroncio	L.N. Vauquelin	1798
Titanio	W. Gregor	1791
	M. Klaproth	1795
Ytrio	J. Gadolin	1794
Vanadio	A.M. del Río	1801
	A.G. Sefström	1830
Niobio	C. Hatchett	1801
Tántalo	A.G. Ekeberg	1802
Paladio	W.H. Wollaston	1803
Sodio	H. Davy	1807
Potasio	H. Davy	1807
Calcio	H. Davy	1808
	J. Berzelius	1808
	M. Pontin	1808
Boro	J. Gay-Lussac	1808
	L. J. Thénard	1808
Magnesio	H. Davy	1808
	A. Bussy	1831
Thorio	J. Berzelius	1817
Litiol.	I. Arfvedson	1817
Cadmio	F. Strohmeyer	1817
Silicio	J. Berzelius	1823
Lantano	C.G. Mosander	1836

NOTA: La aparición de 2 o más nombres asociados al descubrimiento de un elemento, indica una posterior mejor caracterización y/o una mejora en la pureza del elemento obtenido.

En 1851, Bravais enuncia su teoría de redes cristalinas.

En 1858, Sorby utiliza el microscopio de luz reflejada para el estudio de metales. De esta forma se abre el campo a la Metalografía.

E. S. Fiodorov (1853-1919), mediante un riguroso análisis matemático, llega a la Teoría de la estructura de los cristales y, en 1890, publica "Simetría de los sistemas regulares de figuras" donde aparecen por vez primera los 230 grupos espaciales de simetría posibles.

En 1891, el matemático alemán Schoenflies deduce también los 230 grupos espaciales.

En 1891, V.I. Vernadsky (1863-1945) afirma que en los aluminosilicatos el silicio puede estar sustituido por aluminio. Esto sólo podrá demostrarse cuando se realizan los estudios estructurales, mediante rayos X, de feldespatos y otros aluminosilicatos unos años más tarde.

En 1892, E. S. Fiodorov (1853-1919) inventa la platina universal, que permite cuantificar numerosas propiedades ópticas de los minerales.

En 1896, el físico francés H. Becquerel (1852-1908) descubre la radiactividad de los minerales de uranio.

Durante los últimos años del siglo XIX, se diseñan y ponen en funcionamiento los convertidores Bessemer, Thomas y Siemens-Martin que se emplean aún en la actualidad para la obtención del acero.

A finales del siglo XIX, y dado el gran número de elementos químicos que habían sido descubiertos, D. Mendeleiev (1834-1907) publica su Sistema Periódico.

En 1895, Roentgen descubre los Rayos X cuando experimenta con un tubo de Rayos Catódicos. Observa que se propagan en línea recta y que no son desviados ni por campos eléctricos, ni por campos magnéticos. Al mismo tiempo, observa su gran poder de penetración y su capacidad para impresionar placas fotográficas.

Entre los años 1908 y 1914, V.I. Vernadski (1863-1945) estudia los procesos químicos que ocurren en la corteza terrestre y comprueba una serie de hechos investigados también por K. Bischoff (1792-1870) y E. de Beaumont (1798-1874). Estos investigadores, junto V. Goldschmidt (1888-1947) y A. E. Fersman (1883-1945) darán origen a la Geoquímica.

En 1912, Max von Laue atraviesa un cristal de sulfato de cobre con los Rayos X y obtiene, en una placa fotográfica, una serie de puntos que reflejan la simetría de tal sustancia. De esta forma demuestra que los Rayos X son difractados por los átomos de la red cristalina, produciéndose fenómenos de interferencia. Las figuras de interferencia obtenidas son la imagen de la simetría del cristal y de la ordenación espacial de sus átomos. Este fenómeno de difracción de los Rayos X por los átomos se realiza gracias a que su longitud de onda es comparable a las dimensiones atómicas. Por estos experimentos, Laue recibe el Premio Nóbel de Física en 1914.

También en 1912, W. Friedrich y P. Knipping obtienen un espectro de difracción de Rayos X de un cristal de esfalerita.

En los años siguientes, W. H. Bragg, W. L. Bragg (hijo del anterior), L. Pauling, G. Wulf y otros investigadores realizan, gracias a los Rayos X, la determinación de 15000 estructuras. En este momento, la Cristalografía se convierte en uno de los instrumentos fundamentales de la Química y de la Física ya que permite la elucidación de numerosas estructuras, no sólo minerales o inorgánicas, sino también, de naturaleza orgánica.

En el transcurso del siglo XX, se descubren nuevos minerales y elementos químicos. Estos hallazgos vienen dados por el empleo de nuevas técnicas y por la explotación de nuevos recursos.

Durante el siglo XX, se desarrollan nuevas clasificaciones de minerales, ahora ya basadas en criterios mixtos. Se abandona el criterio químico como forma de clasificación y se conjuga tal criterio con los estructurales y con los geoquímicos. Aún así, en 1921, Groth y Mieleitner revisan las clasificaciones químicas de Berzelius y Dana. Pero el problema clasificatorio que plantean los silicatos (sobre todo a partir de la elucidación de muchas de sus estructuras entre 1920 y 1930), hace necesario recurrir a la estructura como segundo criterio clasificatorio.

Algunos autores llegan a dar demasiada importancia al criterio estructural hasta tal punto que se olvidan completamente del contenido químico de los minerales. Este es el caso de Ewald, quien, en 1931, propone una clasificación estructural en la que minerales tales como la galena y la halita aparecen en un mismo grupo. Esta clasificación es inmediatamente descartada. En 1926, P. Niggli había publicado también una clasificación estructural.

También hay autores que se basan únicamente en criterios genéticos, como Machatschki. Pero estas clasificaciones se abandonan cuando se observa que hay minerales (cuarzo, calcita, etc.) que pueden formarse en diversos ambientes.

Convencidos ya todos los autores de que es necesaria una clasificación mixta, se empiezan a confeccionar éstas. Las más conocidas son las de Kostov (1957) y Strunz (1941-1970).

La clasificación de Kostov considera criterios químicos, estructurales y geoquímicos. Dado que la mayoría de los minerales son de naturaleza iónica, utiliza los aniones para establecer las clases y los cationes para subdividir las mismas. En los silicatos debe usar criterios estructurales, sirviendo éstos para la creación de las subclases y los criterios geoquímicos para el establecimiento de grupos. De esta forma Kostov crea una clasificación basándose en los elementos más abundantes en el mundo mineral y en la que aparecen las siguientes clases:

- I ELEMENTOS
- II SULFUROS Y SULFOSALES
- III HALUROS
- IV OXIDOS E HIDROXIDOS
- V SILICATOS:
  - NESOSILICATOS
  - INOSILICATOS
  - FILOSILICATOS
  - TECTOSILICATOS
- V IBORATOS
- VII FOSFATOS, ARSENIATOS Y VANADATOS
- VIII WOLFRAMATOS
- IX SULFATOS, SELENIATOS Y TELURATOS
- X CROMATOS
- XI CARBONATOS
- XII NITRATOS Y IODATOS

Hugo Strunz publicó entre 1941 y 1970 cinco ediciones de la "*Mineralogische Tabellen*" (Leipzig, 1941, 1949, 1957, 1966 y 1970). Esta clasificación fue la base de las empleadas en la actualidad, aunque presentaba problemas con minerales tales como los boratos que aparecían en el mismo grupo que los carbonatos y los nitratos, siendo su estructura polimérica, al contrario que la de aquellos. Pero estos problemas serán subsanados posteriormente. La clasificación de Strunz clásica, por lo tanto, divide a los minerales en 8 clases en función de su composición química:

- I ELEMENTOS NATIVOS
- II SULFUROS, ARSENIUROS, SULFOSALES Y COMPUESTOS SIMILARES
- III OXIDOS E HIDROXIDOS
- IV HALOGENUROS
- V CARBONATOS, NITRATOS Y BORATOS



- VI SULFATOS, CROMATOS, WOLFRAMATOS Y MOLIBDATOS
- VII FOSFATOS, ARSENIATOS Y VANADATOS
- VIII SILICATOS

Dadas las grandes diferencias existentes entre las estructuras de los silicatos, estos quedan divididos en 6 SUBCLASES:

- 1 - Nesosilicatos
- 2 - Sorosilicatos
- 3 - Ciclosilicatos
- 4 - Inosilicatos
- 5 - Filosilicatos
- 6 - Tectosilicatos

El resto de las clases se divide en TIPOS ESTRUCTURALES en base a la estequiometría existente en la fórmula estructural. Dentro de cada Subclase y cada Tipo Estructural se establecen los Grupos y Series.

Se denomina GRUPO a un conjunto de minerales que, presentando el mismo Tipo Estructural, poseen, además, semejanzas geoquímicas. Mientras que se denomina SERIE a un conjunto de minerales que, siendo isoestructurales, muestran cambios graduales de sus propiedades en función de la variación, también gradual, de la composición. En ocasiones, dentro de un mismo grupo, pueden existir distintas series aunque lo más normal es que ambos términos se encuentren al mismo nivel de clasificación.

A continuación se llega al término ESPECIE que es lo más semejante a lo que normalmente se entiende por MINERAL. Se define Especie Mineral como una sustancia homogénea de origen natural e inorgánico, con una composición química definida (dentro de ciertos límites), con propiedades físicas y estructura características.

Se utiliza el concepto de VARIEDAD para referirse a los diferentes aspectos que puede presentar una Especie Mineral en función del color, del hábito o de alguna otra propiedad, siendo las causas fundamentales de tales diferencias las variaciones en la composición química o los defectos en la estructura cristalina.

Los problemas de clasificación ocasionados por los minerales amorfos se resuelven eludiendo los criterios estructurales y acudiendo exclusivamente a su composición química.

En la actualidad hay numerosos minerales cuya estructura no ha sido investigada o aparece poco clara, ello dificulta también su clasificación. El

caso de minerales cuya composición no ha sido bien establecida o presenta grandes divergencias es menos frecuente pero no improbable.

Son numerosas las sustancias cuya estructura varía por factores externos, tales como la temperatura o la presión. En este caso, la clasificación se realiza en base a la fase estable en condiciones normales. También existen fases metaestables, es decir, que se encuentran en la naturaleza pero que termodinámicamente no son estables. La razón está en la lenta velocidad de transformación a una fase estable o en la existencia de barreras cinéticas que deben ser superadas (diamante-grafito, aragonito-calcita).

Otro problema histórico lo constituyen las sustancias minerales no sólidas (mercurio, agua, etc.). Hoy en día no se requiere que una sustancia sea sólida para considerarla mineral.

Durante el año 2001 se publica la 9ª edición de "Strunz Mineralogical Tables" (Hugo Strunz, Ernest Nickel), en versión inglesa y que había sido presentada en la Reunión de Pisa de 1994.

Gracias a los avances científicos y tecnológicos, cada año se incorporan entre 60 y 80 nuevas especies minerales a una lista que ya supera, con creces, las 4000, según los criterios de la Comisión de Nuevos Minerales y Nombres de Minerales de la I.M.A. (International Mineralogical Association). Por ello ya era necesario el establecimiento de un tipo de clasificación mineral que tuviera en cuenta los criterios más adecuados y permitiera la inserción de todas las nuevas especies sin tener que cambiar los aspectos básicos.

Se crea una clase nueva que incluye los boratos y que tiene en cuenta su capacidad para la polimerización y la existencia de unidades estructurales básicas, tanto plano-trianguulares ( $\text{BO}_3^{3-}$ ), como tetraédricas ( $\text{BO}_4^{5-}$ ).

Se da una mayor entidad a los minerales orgánicos que se incluyen en la clase 10ª.

El uso de códigos alfanuméricos elimina definitivamente los caracteres romanos y permite una sistemática más abierta y con más posibilidades en las subdivisiones.

Las 10 clases minerales son, actualmente:

- 1.- ELEMENTOS
- 2.- SULFUROS Y SULFOSALES

- 3.- HALUROS
- 4.- OXIDOS (se incluyen hidróxidos, arsenitos, antimonitos, bismutitos, sulfitos, selenitos, iodatos y ciertos vanadatos)
- 5.- CARBONATOS Y NITRATOS
- 6.- BORATOS
- 7.- SULFATOS, SELENIATOS, TELURATOS, CROMATOS, MOLIBDATOS Y WOLFRAMATOS
- 8.- FOSFATOS, ARSENIATOS Y VANADATOS
- 9.- SILICATOS Y GERMANATOS
- 10.- MINERALES ORGANICOS DIVERSOS (incluye hidrocarburos, oxalatos, acetatos, cianatos, derivados del benceno, etc.).

Las **ideas básicas** de dicha clasificación son:

La ESPECIE MINERAL constituye la unidad básica de la clasificación. Su definición clásica:

*ESPECIE MINERAL es una SUSTANCIA NATURAL y HOMOGENEA, de ORIGEN INORGANICO, con una COMPOSICION QUIMICA DEFINIDA, dentro de ciertos límites, que posee unas PROPIEDADES CARACTERISTICAS y que, generalmente, tiene ESTRUCTURA CRISTALINA.*

Fue modificada en 1995, por la siguiente:

*Un MINERAL es un ELEMENTO o un COMPUESTO QUIMICO que normalmente es CRISTALINO y que se ha formado como consecuencia de PROCESOS GEOLOGICOS.*

Si se leen ambas con cuidado, se verá que son totalmente compatibles.

El GRUPO es una unidad sistemática mayor que la SERIE. En un GRUPO pueden considerarse ESPECIES más o menos relacionadas químicamente, pero no tienen por que tener relaciones estructurales, o SERIES formadas por compuestos isoestructurales. Los "términos extremos" de una serie corresponden a composiciones definidas, siendo los diferentes "términos

intermedios" de las mismas el resultado de la "combinación" de las composiciones extremas en determinados rangos de proporciones o, por ser más exactos, de la sustitución diadómica de ciertos átomos.

Por ejemplo, el GRUPO DEL OLIVINO se compone de 3 Series y varias especies y variedades más.

**GRUPO DEL OLIVINO** (rómicos, salvo indicación)

Serie de la Forsterita-Fayalita

Forsterita (Peridoto blanco)	$Mg_2SiO_4$
Crisolita	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ (10-30% $Fe_2SiO_4$ )
Hialosiderita	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ (30-50% $Fe_2SiO_4$ )
Hortonolita	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ (50-70% $Fe_2SiO_4$ )
Ferrohortonolita	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ (70-90% $Fe_2SiO_4$ )
Fayalita	$Fe_2SiO_4$

Serie de la Fayalita-Tefroita

Fayalita	$Fe_2SiO_4$
Knebellita	$(Fe,Mn)_2SiO_4$
Roepperita	$(Fe,Mn,Zn)_2SiO_4$ (Fe:Mn:Zn=4:2:1)
Igleströmita	20-40% $Mn_2SiO_4$
Manganknebellita	$Mn/(Mn+Fe)=0.7$
Talcoknebellita	Con Mg
Tefroita	$Mn_2SiO_4$

Serie de la Forsterita-Tefroita

Forsterita	$Mg_2SiO_4$
Picrotefroita	$(Mg,Mn)_2SiO_4$
Tefroita	$Mn_2SiO_4$

Otros olivinos

Larnita	$\beta-Ca_2SiO_4$ (monoclínico)
Calcio-olivino	$\alpha-Ca_2SiO_4$ (rómico)
Larsenita	$PbZnSiO_4$
Monticellita	$CaMgSiO_4$
Glaucoicroita	$(Mn,Ca)_2SiO_4$
Liebensbergita	$(Mg,Ni)_2SiO_4$
Esperita	$(Ca,Pb)ZnSiO_4$
Kirschteinita (Ferromonticellita)	$CaFeSiO_4$
Wadsleyita	$\beta-(Mg,Fe)_2SiO_4$ (rómico)
Ringwoodita	$\gamma-(Mg,Fe)_2SiO_4$ (cúbico)

Otras series que se pueden mencionar son la SERIE DE LAS PLAGIOCLASAS (Albita-Anortita), que forma parte del GRUPO DE LOS FELDESPATOS, la SERIE DE LAS ESPINELAS, que forma parte de la CLASE DE LOS OXIDOS (OXIDOS MULTIPLES), la SERIE DE LOS CARBONATOS TRIGONALES, etc. En este grado de la clasificación es donde aparecen los mayores problemas, ya que es continua la aparición de trabajos que revisan estructuras, composiciones y procesos de formación de materiales.

Se aplica el concepto de VARIEDAD a los distintos aspectos que puede presentar una especie, bien sea por pequeñas variaciones en la composición química que suelen originar cambios de color (la esmeralda es una variedad de berilo que contiene cromo y es verde) o bien por presentarse con diferentes hábitos característicos (yeso fibroso, rosa del desierto, punta de lanza,...).

Teniendo en cuenta el concepto de variedad, debe quedar claro que las distintas polimorfías o formas polimórficas de una misma sustancia no constituyen variedades sino que cada una es una especie mineral distinta. Así, por ejemplo, cada una de las formas alotrópicas del azufre es una especie distinta, lo mismo que las polimorfías del cuarzo ( $\alpha$ -cuarzo y  $\beta$ -cuarzo) que presentan leves diferencias estructurales también deben de ser consideradas especies diferentes, aunque alguna de ellas no suelen encontrarse en la Naturaleza. Por lo que respecta al fenómeno de la sustitución isomórfica, hemos de tener en cuenta que las diferentes denominaciones que se dan a los términos de una serie isomórfica no suelen estar fijados de una forma muy estricta, salvo en algunos casos. De este modo, surgen tanto especies como variedades, por ello conviene prestar atención a la normativa de la I.M.A. al respecto.

Los minerales amorfos dan lugar a problemas de clasificación. Se incluyen en las clases y grupos con mayor similitud química. Un caso interesante es el de la sílice:

## **GRUPO DE LA SILICE**

### Subgrupo del Cuarzo

Cuarzo (Cuarzo Bajo)	$\alpha$ -SiO <sub>2</sub> (trigonal)(t<573°C)
Cuarzo Alto	$\beta$ -SiO <sub>2</sub> (hexagonal)(573-870°C)
Tridimita Baja	SiO <sub>2</sub> (rómbo)
Tridimita Media	SiO <sub>2</sub> (hexagonal)
Tridimita Alta	SiO <sub>2</sub> (hexagonal)(870-1470°C)
Cristobalita Baja	SiO <sub>2</sub> (tetragonal)
Cristobalita Alta	SiO <sub>2</sub> (cúbico)(1470-1723°C)

### Subgrupo de la Coesita

Coesita	SiO <sub>2</sub> (monoclínico)(p>20kbar)
Stishovita	SiO <sub>2</sub> (tetragonal)(p>160kbar)
Keatita	SiO <sub>2</sub> (tetragonal)

### Subgrupo del Opalo

Opalo-A	SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O (amorfo) (ver apéndice)
Opalo-CT	Con cristobalita y tridimita
Opalo-T	Con tridimita.
Moganita	SiO <sub>2</sub> ó SiO <sub>2</sub> -G (monoclínico,impura)
Lechatelierita	SiO <sub>2</sub> (amorfo)
Fulgurita	Con aspecto vítreo.
Silhidrita	3SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O (ortorrómbico)
Melanoflogita	SiO <sub>2</sub> +moléculas gaseosas (tetragonal)(t<40°C)
β-Melanoflogita	SiO <sub>2</sub> +moléculas gaseosas (cúbico)(t>40°C)

Los minerales líquidos, se incluyen también en las clases y grupos con mayor similitud química. Por ejemplo, el mercurio es un elemento y el agua (sólida y/o líquida) es un óxido.

## UNAS NOTAS SOBRE LA SITUACION ACTUAL DE LA MINERALOGIA

La Mineralogía, junto con la Cristalografía, constituye actualmente un área de conocimiento básico para la Química y la Geología. La conexión entre la Mineralogía y estas dos ramas del saber científico es bastante clara. Por un lado, dada la procedencia de los minerales, es importante la conexión con la Geología, fundamentalmente a través de la Geoquímica (estudio de los elementos químicos en la Tierra), de la Petrología (estudio de las rocas o asociaciones de minerales) y del estudio de los yacimientos o depósitos de minerales.

El estudio de los minerales como sustancias químicas que son, constituye uno de los objetivos de la Química. El desarrollo de la Química Analítica se inicia cuando se ponen a punto métodos de análisis de minerales y de otras sustancias inorgánicas relacionadas con ellos (menas, metales, aleaciones, cerámicas, etc.). Posteriormente la Química Analítica abarcaría también el estudio de materiales orgánicos y biológicos. La Química Inorgánica, se ha encargado de la caracterización y de la síntesis de sustancias minerales y de sus derivados, así como del desarrollo de técnicas de beneficio de minerales. Hoy en día hay lugares en que la Química Inorgánica se denomina Química Mineral, lo cual da una idea de esta importante relación. En realidad, los minerales deben considerarse como compuestos inorgánicos sintetizados por la Naturaleza, muchas veces con un elevado contenido de impurezas. Realmente muchos minerales aún no se han conseguido preparar en el laboratorio.

La relación entre la Mineralogía y la Cristalografía es histórica, puesto que los primeros cristales que se observaron eran minerales. Posteriormente el desarrollo de la Cristalografía se ha basado en el estudio de sustancias inorgánicas, en general. El estudio de cristales orgánicos se empezó a realizar más recientemente y en la actualidad, el tratamiento es igual, tanto para materiales orgánicos, como para materiales inorgánicos, ya que las tendencias han ido desde una Cristalografía Morfológica a una Cristalografía Estructural. Cada vez más la Cristalografía se apoya en la resolución de estructuras mediante métodos físico-químicos. Por ello, la Cristalografía constituye una disciplina interesante para todo científico que se dedique a la caracterización y a la síntesis de materiales.

La determinación de las propiedades físicas de las sustancias, incluidos los minerales (Cristalofísica), mejora su caracterización y el estudio de las aplicaciones. Las disciplinas técnicas (Ingeniería, Arquitectura,...) necesitan unos ciertos conocimientos mineralógicos, en relación con los materiales que se emplean para la construcción de todo tipo de edificios y obras públicas en general.

Recientemente la Mineralogía viene llamando la atención de los arqueólogos, pues supone un medio de estudio de una gran variedad de materiales arqueológicos.

Por lo que respecta a los campos de actividad de la Mineralogía, se pueden resumir en los puntos siguientes:

**MINERALOGIA DE CAMPO:** Se encarga de la búsqueda y de las primeras caracterizaciones de minerales encontrados en la Naturaleza. Normalmente esta labor la realizan los geólogos.

**MINERALOGIA DETERMINATIVA:** Caracterización, mediante técnicas más o menos sofisticadas, de las especies minerales. En la determinación de minerales deben considerarse aspectos cualitativos y cuantitativos y la metodología se basa en la Química Analítica. Este labor viene desarrollada por los químicos.

**FISICA Y QUIMICA MINERAL:** Se ponen de manifiesto y se profundiza en las características físicas y químicas de los minerales, incluyendo su estructura y las propiedades que de ella derivan.

**MINERALOGIA DESCRIPTIVA:** Estudio sistemático de las especies minerales. Es de gran importancia a la hora de establecer clasificaciones minerales. Para ello deben considerarse todos los aspectos contemplados en los demás campos de actividad. La Mineralogía Descriptiva constituye el escaparate más visible de esta disciplina científica.

**MINERALOGENESIS Y SINTESIS MINERAL:** Obtención en el laboratorio de materiales de naturaleza mineral con fines diversos: Aplicaciones industriales, estudio de yacimientos, apoyo a otras áreas de actividad,...

**MINERALOTECNIA:** Estudio de beneficio de yacimientos. Relacionada con la Metalurgia y la Ingeniería.

**GEOQUIMICA:** Ayuda a comprender la distribución de elementos y minerales, así como la evolución de los diferentes procesos que ocurren en el mundo mineral u otros relacionados.

**GEOTERMOMETRIA:** Estudia los diagramas de equilibrio, las transiciones de fase y la cinética de las reacciones que ocurren en el entorno de los minerales.

**ESTUDIO DE PROCESOS SEDIMENTARIOS:** Estudios de erosión, transporte, depósitos sedimentarios y de sus incidencias climáticas y ecológicas.



**YACIMIENTOS:** Se estudia la distribución de los yacimientos de todo tipo y su caracterización, ya sea para fines industriales o para fines puramente científicos.

El conjunto de áreas de actividad de la Mineralogía no está cerrado y continuamente se abren nuevas posibilidades. Ello viene marcado, entre otras cosas, por el acceso a nuevas tecnologías.

Por otro lado, la Mineralogía, junto con la Botánica y la Zoología sigue siendo una de las tres ventanas principales para la observación de la Naturaleza. A este respecto, deben tenerse en cuenta los Museos de Ciencias Naturales y otros tipos de actividades que muestren los Tres Reinos de la Naturaleza.