

# Manual de Mineralogía

Vol. 1

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

Cornelis Klein \ Cornelius S. Hurlbut, Jr

EDITORIAL REVERTÉ



# Manual de Mineralogía

## Vol. 1

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

**Cornelis Klein**

The University of New Mexico

**Cornelius S. Hurlbut, Jr**

Harvard University



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

*Título de la obra original:*

**Manual of Mineralogy, 21<sup>st</sup> Edition**

*Edición original en lengua inglesa publicada por*

**John Wiley & Sons, Inc., New York, USA**

Copyright © by John Wiley & Sons, Inc.

*Edición en español:*

© Editorial Reverté, S. A., 1997

Edición en papel

ISBN: 978-84-291-4606-6 Tomo I

ISBN: 978-84-291-4607-3 Tomo II

ISBN: 978-84-291-4608-0 Obra completa

Edición e-book (PDF)

**ISBN: 978-84-291-9455-5 Tomo I**

ISBN: 978-84-291-9456-2 Tomo II

*Versión española por*

**Dr. J. Aguilar Peris**

Catedrático de Termología de la Universidad Complutense de Madrid

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

# 1179

La mineralogía es una parte fundamental de la educación de los alumnos de geología y puede también formar parte de un currículum en ciencia de los materiales. Para ello se requiere el desarrollo de uno o más cursos de mineralogía. Estos cursos se consideran requisitos previos para cursar otros de nivel superior en petrología, geoquímica, geología económica o en la propia mineralogía. El primer curso de esta ciencia debe tratar tanto los conceptos básicos como los aspectos descriptivos de los minerales más comunes. Generalmente los conceptos y principios básicos se imparten en las clases teóricas, mientras que los aspectos descriptivos y el estudio de las muestras de minerales y rocas se tratan generalmente en el laboratorio. Debido a esta dualidad (conceptos frente a materiales descriptivos), los profesores suelen tener una preferencia personal a la hora de poner el énfasis en uno u otro aspecto. Por ello, algunos textos destacan especialmente el orden interno de los cristales, sus propiedades químicas y los aspectos estructurales de los cristales, así como la evaluación cuantitativa de las propiedades físicas, tales como el color, el magnetismo, la dureza, la densidad y los parámetros ópticos. En cambio, otros textos pueden conducir a los estudiantes hacia un trabajo exhaustivo de laboratorio, relacionado con los aspectos más descriptivos y determinativos de la mineralogía. Este último enfoque prepara mejor al estudiante para la petrología de muestreo a costa de una menor preparación en los aspectos más conceptuales de la ciencia.

En esta nueva edición (cuarta versión española, correspondiente a la 21ª edición americana del *Manual de Mineralogía*) intentaremos de nuevo conseguir un equilibrio entre conceptos y principios por una parte, y entre el tratamiento descriptivo y sistemático de la mineralogía por otra. Este objetivo equilibrado requiere el tratamiento de muchos temas. No todos ellos pueden tratarse en un curso de un año y mu-

cho menos en un curso semestral o trimestral. En esta edición, los capítulos 2 a 9 se refieren a conceptos, principios y técnicas. Los capítulos 10 a 13 tratan de la mineralogía sistemática y descriptiva. El capítulo 14 es una introducción a la petrología y el Capítulo 15 ofrece una introducción a las gemas más comunes.

Esta edición incorpora importantes revisiones y adiciones al tratamiento ofrecido en la edición anterior. Así se incorpora un capítulo casi totalmente nuevo sobre “Química de cristales” (Capítulo 4) y una importante revisión de “Química de minerales” (incorporada al Capítulo 5); incluye un nuevo capítulo sobre “Diagramas de estabilidad de los minerales” (Capítulo 9) a fin de preparar al estudiante para el uso extensivo de estos diagrama en los capítulos subsiguientes (capítulos 10 a 14) sobre “Mineralogía sistemática” y “Conjuntos minerales”; presenta un tratamiento más lógico de “Morfología” (Capítulo 2) que en la edición anterior a costa de un menor énfasis sobre la simetría interna en el Capítulo 2; en el Capítulo 3 “Orden y simetría interna” se incorpora una nueva secuencia lógica y bien ilustrada del orden y la simetría en una, dos y tres dimensiones; por último, en los capítulos que tratan la “Mineralogía sistemática” (Capítulos 10 a 13) se eliminan las referencias sobre información poco usada (por ejemplo, ángulos interfaciales, relaciones axiales, y datos químicos obtenidos por soplete) y se incluye información actualizada sobre yacimientos minerales importantes. A lo largo de esta nueva edición se han incluido abundantes nuevas ilustraciones para una mejor comprensión de los conceptos abordados en el texto.

El principal tema unificador de este texto, al igual que en las ediciones anteriores, es el de “Química de cristales”, es decir, el estudio y aclaración de las relaciones entre composición química, estructura interna y propiedades físicas de la

materia cristalina. La materia expuesta en los ocho primeros capítulos ha sido dispuesta de modo que el profesor pueda elegir aquellos capítulos que considere más esenciales. Resultará imposible en la mayor parte de los cursos cubrir la materia expuesta en estos capítulos. Por ejemplo, los capítulos 7 y 8 sobre mineralogía de rayos X y mineralogía óptica respectivamente, no juegan por regla general un papel importante en un curso de introducción a la mineralogía. Sin embargo, se incluyen estos temas porque en el tratamiento subsiguiente sobre “mineralogía sistemática”, la descripción de cada especie mineral incluye un listado de diagnósticos por rayos X y propiedades ópticas. De igual modo, el Capítulo 15, sobre gemas, puede no ser esencial en un curso específico. Sin embargo, si el estudiante desea conocer cuáles son las técnicas de rayos X y ópticas utilizadas para la determinación de los distintos parámetros y qué cualidades únicas distinguen las piedras preciosas de los minerales ordinarios, la exposición pertinente puede localizarse en los capítulos apropiados.

El Capítulo 1 proporciona una breve introducción a la historia de la mineralogía, a las fuentes de su literatura y a algunos de los desarrollos recientes sobre la instrumentación que permite la evaluación química estructural de los materiales cristalinos a escala muy pequeña. Incluye también una relación de aquellos científicos que han realizado contribuciones reconocidas internacionalmente en los campos de la mineralogía, petrología y geoquímica en las últimas cinco décadas.

En el Capítulo 2 trata de la forma externa y de la simetría de los cristales, mientras que el orden interno se trata en el Capítulo 3. La exposición dentro del capítulo se verifica de modo que el estudio de la forma externa y la deducción de la simetría correspondiente pueda cubrirse sin referencia a la proyección estereográfica, si el profesor así lo desea. Esta proyección se introduce en la página 60, después de la cual cada uno de los sistemas cristalinos (y clases de cristales) se trata sistemáticamente con estereogramas. Al igual que en la edición anterior (20ª edición americana), el tratamiento sistemático de la morfología cristalina comienza con el cristal de más baja simetría y termina con el sistema de simetría máxima. Sin embargo, dentro de cada sistema cristalino, las clases de cristales se disponen en orden de simetría decreciente. Aunque esto parece ilógico respecto a la simetría creciente de los sistemas cristalinos, esta secuencia de clases de cristales es menos complicada, porque las clases de menor simetría pueden describirse como casos especiales de la clase de máxima simetría. Además, si se carece del tiempo su-

ficiente para el desarrollo de todas las clases de cristales, pueden tratarse al menos aquéllas de máxima simetría.

El Capítulo 3 trata del orden en diagramas ordenados de una, dos y tres dimensiones y proporciona una introducción a los grupos espaciales. La secuencia lógica de discusión de los aspectos de simetría y traslación de diagramas de una, dos y tres dimensiones ha sido muy revisada y mejorada en esta edición. Esperamos que esto permita al estudiante alcanzar una mejor comprensión de los componentes de simetría única y traslación de filas, de distribuciones planarias (redes planarias y grupos puntuales) distribuciones ordenadas de tres dimensiones (incluyendo el desarrollo de las redes de Bravais y su relación con los grupos espaciales). El último objetivo de este capítulo es familiarizar al estudiante con las interrelaciones que existen entre la morfología externa, la estructura interna y la notación del grupo espacial. Tal conexión está elaborada con considerable detalle para tres minerales comunes. La exposición del orden ideal en tres dimensiones se continúa con una exposición muy amplia del isoestructuralismo, polimorfismo, politipismo, el estado metamórfico y las complejidades y defectos estructurales. El análisis de la morfología (Capítulo 2) precede al tratamiento del orden interno (Capítulo 3). Hemos tomado esta decisión porque muchos estudiantes encuentran más fácil localizar la simetría en objetos físicos (por ejemplo, modelos cristalinos) que en diseños más abstractos (tales como diagramas de motivos). Sin embargo, esta secuencia no es necesaria en un curso específico, ya que ninguno de los dos capítulos es requisito previo para el estudio del otro.

El Capítulo 4, sobre “Cristaloquímica”, ofrece un tratamiento completamente revisado y mucho más amplio del tema. Para aquellos estudiantes con un buen conocimiento previo en química, este capítulo ofrece una buena revisión sobre el tema, los estudiantes con menor formación química encontrarán una introducción eficiente y de fácil comprensión. El texto avanza desde una exposición sobre el átomo, el sistema periódico, el modelo atómico de Bohr, el modelo de Schrödinger a través de la notación cuántica y la configuración electrónica, sigue con los conceptos de ion, radios iónicos y atómicos, coordinación, relaciones radiales, mecanismos de enlace químico y termina con una introducción a los tipos estructurales, cambios de tipos estructural en función de la profundidad creciente en la Tierra y aspectos de la radiatividad.

El Capítulo 5, sobre “Química mineral”, ofrece una supervisión introductoria de las técnicas de análisis químico más usadas, tales como análisis químico húmedo, espectroscopía de absorción atómica, fluorescencia de rayos X, técni-

cas de microsonda electrónica y análisis espectrográfico óptico. A continuación se expone una discusión detallada de la variación en composición de minerales, como resultado de diversos mecanismos de soluciones sólidas. Otro concepto importante es el de exsolución o desmezcla previo a una discusión extensa con ejemplos de nuevos cálculos de análisis minerales y diversos esquemas de representaciones gráficas de datos químicos.

El Capítulo 6 sobre “Propiedades físicas de los minerales” trata de propiedades como la exfoliación, dureza, densidad, color y magnetismo. En este capítulo se han renovado completamente las secciones de color y magnetismo a base de los conceptos químicos cristalinos desarrollados en el Capítulo 4.

Los Capítulos 7 y 8 tratan específicamente de la cristalografía de rayos X y de las propiedades ópticas de los cristales, son muy semejantes a los de la edición anterior.

El Capítulo 9, “Diagramas de estabilidad de los minerales” es totalmente nuevo y suministra una introducción a los diagramas de estabilidad comúnmente utilizados para ilustrar los equilibrios de los minerales. Comienza con una breve introducción a algunos aspectos básicos de la termodinámica, pero su parte principal está dedicada a una comprensión básica de diagramas de uno, dos y tres (o más) componentes, diagramas para reacciones minerales que implican  $H_2O$  ó  $CO_2$  y representaciones Eh-pH. Está ilustrado abundantemente con ejemplos de relaciones de estabilidad de minerales que comúnmente forman parte de la composición de las rocas, la mayoría de los cuales se muestran de nuevo en capítulos subsiguientes (del 10 al 13) que tratan de “Mineralogía sistemática”. Este nuevo Capítulo 9 está diseñado específicamente para suministrar al estudiante un conocimiento básico de la estabilidad de los minerales *antes* de la exposición sobre minerales específicos y los aspectos interpretativos de su ocurrencia.

Los Capítulos 10 a 13 tratan de las descripciones sistemáticas de unos 200 minerales, así como de sus asociaciones petrológicas y las localizaciones geográficas de las más importantes localidades minerales. La descripción de cada grupo mineral o serie principal de minerales vienen precedida por una sinopsis de las características más notables de su química y estructura. Cada una de las aproximadamente 200 descripciones contiene una sección sobre “Composición y estructura”. Las estructuras minerales vienen ilustradas con las mejores representaciones disponibles poliédricas y geométricas. A estos cuatro capítulos se han añadido aproximadamente 40 nuevas ilustraciones (incluyendo representaciones de estructuras, fotografías del microscopio

electrónico de alta resolución, reproducciones de especies minerales y dibujos de línea). Cada una de las descripciones minerales se ha diseñado eliminando los datos de los ángulos interfaciales, relaciones axiales y análisis de soplete.

El Capítulo 14, sobre “Conjuntos minerales”, presenta una breve introducción a la petrología y su relación con la mineralogía. La exposición incluye esquemas actualizados de clasificación de tipos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. También se incluyen representaciones gráficas de conjuntos de rocas metamórficas.

El Capítulo 15 proporciona una breve supervisión de las gemas más corrientes y las técnicas usadas en gemología. Contienen cuatro láminas en color de gemas y minerales de gemas. Este tema ha sido incluido en el texto –normalmente no se incluye en los textos mineralogía– por la siguiente razón: Los estudiantes de mineralogía terminan sus estudios de esta ciencia y generalmente no saben más sobre las gemas que un profano en este tema. Esto es desafortunado, pero también innecesario. Muy pocos cursos de mineralogía, si es que los hay, incluirán una importante exposición sobre gemas y mucho menos tendrán un laboratorio sobre esta especialidad. Sin embargo, el estudiante encontrará en este capítulo el tratamiento necesario (sin referencia a ningún curso) para convertirse en un cliente bien informado de cualquier establecimiento o joyería de piedras preciosas.

Al final de cada capítulo se ofrecen referencias seleccionadas que pueden orientar al estudiante dentro la literatura más relevante sobre el tema. Las tablas determinativas (Apéndice) y el Índice de minerales, todo ello actualizado, son especialmente útiles para el estudio en el laboratorio y para la identificación de minerales desconocidos.

Resumiendo, al escribir esta edición del *Manual de Mineralogía* nuestro objetivo era el de crear un libro de introducción a la mineralogía que cumpliera dos propósitos: (1) proporcionar al estudiante un conocimiento actualizado de los conceptos y principios básicos de cristalografía, química de cristales, química general, aspectos físicos de los minerales y conceptos de petrología introductorios, esenciales para comprender la génesis de los minerales y rocas; y (2) suministrar una referencia para la identificación rápida y certera de los minerales comunes en el campo y en el laboratorio. Este libro ha sido diseñado para ambos objetivos: un curso de iniciación mineralogía y una referencia mineralógica permanente. Así se ha intentado, con vistas a los alumnos que realizarán posteriores trabajos en mineralogía, así como a aquéllos que seguirán un solo curso sobre este tema.

## RECONOCIMIENTOS

---

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a diversos colegas que nos proporcionaron (1) revisiones de la edición 20 del Manual de Mineralogía y/o (2) revisiones de los primeros seis capítulos de la presente edición:

Marc J. Defant, University of South Florida,  
 Malcolm D. Hill, Northeastern University,  
 David M. Jenkins, State University of New York at Binghamton,  
 Bruce M. Loeffler, Colorado College, y  
 Paul H. Ribbe, Virginia Polytechnic Institute and State University.

También agradecemos a los siguientes colegas que revisaron secciones específicas de este texto:

Andrew R. Campbell, New Mexico Institute of Mining and Technology,  
 Carl A. Francis, Harvard University,  
 John Husler, University of New Mexico,  
 Gregory J. McCarthy, North Dakota State University,  
 Henry O. A. Meyer, Perdue University,  
 William C. Metropolis, Harvard University,  
 Malcolm Ross, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, y  
 Crayton J. Yapp, University of New Mexico.

Muchas de las nuevas fotografías de estructuras obtenidas con el microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM) y de muestras minerales para esta edición fueron generosamente proporcionadas por

Jillian F. Banfield, University of Wisconsin,  
 Peter R. Buseck, Arizona State University,  
 Rodney C. Ewing, University of New Mexico,  
 Carl A. Francis, Harvard University,  
 Ermanno Galli, Instituto di Mineralogia e petrologia, Modena, Italia,  
 Eugene A. Smelick, Princeton University,  
 David R. Veblen, Johns Hopkins University, y  
 LuMin Wang, University of New Mexico.

El procesado por ordenador de la mayor parte de las revisiones de esta edición fue en su mayor parte realizado con eficacia y entrega por Mabel T. Chavez de Santo Domingo Pueblo.

C. K. agradece especialmente a su mujer, Angela, por su continuo apoyo.

*Cornelis Klein*  
*Cornelius S. Hurlburt, Jr.*



# ÍNDICE ANALÍTICO

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

---

1.1 Definición de mineral	2
1.2 Historia de la mineralogía	4
1.3 Importancia económica de los minerales	14
1.4 Nombre de los minerales	14
1.5 Bibliografía y referencias de mineralogía	15
Referencias y lecturas recomendadas	15

## CAPÍTULO 2 CRISTALOGRAFÍA

---

2.1 Cristalización	18
2.1.1 Crecimiento de un cristal	19
2.2 Orden interno en los cristales	20
2.3 Elementos de simetría (sin traslación)	23
2.3.1 Resumen de las operaciones de simetría sin traslación	33
2.4 Morfología de los cristales	37
2.4.1 Simetría cristalina	41
2.4.2 Ejes cristalográficos	42
2.4.3 Forma	47
2.4.4 Zonas	56
2.4.5 Hábito cristalino	56
2.5 Medida de los ángulos cristalinos	57
2.6 Proyecciones cristalinas	59
2.6.1 Proyección esférica	59
2.6.2 Proyección estereográfica	60
2.7 Las treinta y dos clases cristalinas	69
2.7.1 Sistema triclínico	71
2.7.2 Sistema monoclinico	74
2.7.3 Sistema ortorrómbico	78
2.7.4 Sistema tetragonal	82
2.7.5 Sistema hexagonal	89

2.7.6 Sistema isométrico	101
2.8 Intercrecimiento de cristales	110
Referencias y lecturas sugeridas	116

## CAPÍTULO 3 CRISTALOGRAFÍA: ORDEN INTERNO Y SIMETRÍA

---

3.1 Direcciones y distancias de traslación	119
3.2 Orden monodimensional (filas)	122
3.3 Orden bidimensional (redes planas)	122
3.3.1 Restricciones del ángulo de rotación	126
3.3.2 Contenido de simetría de los motivos planarios	126
3.3.3 Contenido de simetría de las redes planarias	127
3.3.4 Grupos planarios bidimensionales	129
3.4 Orden tridimensional	134
3.4.1 Redes tridimensionales	134
3.4.2 Ejes helicoidales y planos de deslizamiento	140
3.5 Grupos espaciales	146
3.6 Estructura cristalina	158
3.6.1 Determinación de las estructuras cristalinas	158
3.6.2 Ilustración de las estructuras cristalinas	160
3.7 Isoestructuralismo	163
3.8 Polimorfismo	166
3.9 Politipismo	172
3.10 Minerales metamórficos	173
3.11 Mineraloides (minerales no cristalinos)	175
3.12 Pseudomorfismo	176
3.13 Complejidades y defectos estructurales	176
3.14 Maclas	181
3.14.1 Origen de las maclas	182
Referencias y lecturas sugeridas	183

## CAPÍTULO 4 CRISTALOQUÍMICA

<b>4.1 El átomo</b>	<b>186</b>
4.1.1 Elementos químicos y el sistema periódico	187
4.1.2 El modelo de Bohr del átomo	187
4.1.3 El modelo de Schrödinger del átomo	191
4.1.4 Configuración electrónica y la tabla periódica	196
<b>4.2 El ion</b>	<b>199</b>
4.2.1 Radios atómicos y iónicos	202
<b>4.3 Coordinación de iones</b>	<b>207</b>
4.3.1 Relación de radios	209
<b>4.4 Fuerzas de enlace en los cristales</b>	<b>218</b>
4.4.1 Enlace iónico	219
4.4.2 Enlace covalente	222
4.4.3 Evaluación del carácter del mecanismo de enlace	224
4.4.4 Enlace metálico	224
4.4.5 Enlace de van der Waals	225
4.4.6 Enlace de hidrógeno	227
4.4.7 Cristales con más de un tipo de enlace	228
<b>4.5 Ejemplos de algunos tipos de estructura comunes</b>	<b>228</b>
4.5.1 Estructura del NaCl	229
4.5.2 Estructura del CsCl	229
4.5.3 Estructura de la esfalerita (ZnS)	229
4.5.4 Estructura del CaF <sub>2</sub>	230
4.5.5 Estructura del rutilo (TiO <sub>2</sub> )	231
4.5.6 Estructura de la perovskita (ABO <sub>3</sub> )	231
4.5.7 Estructura de la espinela (AB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	232
4.5.8 Estructuras de silicatos	234
<b>4.6 Cambios del tipo de estructura por causa de las altas presiones</b>	<b>234</b>
4.6.1 Radiactividad	237
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>239</b>

## CAPÍTULO 5 QUÍMICA MINERAL

<b>5.1 Composición química de la corteza terrestre</b>	<b>242</b>
<b>5.2 Técnicas químicas analíticas</b>	<b>245</b>
5.2.1 Análisis químico húmedo	246
5.2.2 Análisis gravimétrico	246
5.2.3 Espectroscopía de absorción atómica	246
5.2.4 Fluorescencia de rayos X	248
5.2.5 Microanálisis de sonda electrónica	250
5.2.6 Análisis espectrográfico óptico	253
<b>5.3 Variación en la composición de los minerales</b>	<b>253</b>
5.3.1 Solución sólida sustitucional	255
5.3.2 Solución sólida intersticial	256
5.3.3 Solución sólida con omisión	256
<b>5.4 Desmezcla</b>	<b>258</b>
<b>5.5 Análisis químicos elementales</b>	<b>261</b>
<b>5.6 Representación gráfica de la composición de los minerales</b>	<b>267</b>
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>273</b>

## CAPÍTULO 6 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES

<b>6.1 Hábitos y agregados cristalinos</b>	<b>276</b>
<b>6.2 Exfoliación, partición y fractura</b>	<b>278</b>
6.2.1 Exfoliación	278
6.2.2 Partición	280
6.2.3 Fractura	280
<b>6.3 Dureza</b>	<b>280</b>
<b>6.4 Tenacidad</b>	<b>282</b>
<b>6.5 Peso específico</b>	<b>282</b>
6.5.1 Peso específico medio	283
6.5.2 Determinación del peso específico	283
<b>6.6 Color</b>	<b>286</b>
6.6.1 Transiciones de campo en cristales	287
6.6.2 Transiciones orbitales moleculares	290
6.6.3 Centros de color	292
6.6.4 Otras causas del color	293
6.6.5 Huella	293
6.6.6 Brillo	293
6.6.7 Juego de colores	294
<b>6.7 Tornasolado y asterismo</b>	<b>295</b>
6.7.1 Luminiscencia	296
6.7.2 Fluorescencia y fosforescencia	296
6.7.3 Termoluminiscencia	298
6.7.4 Triboluminiscencia	298
<b>6.8 Propiedades eléctricas</b>	<b>298</b>
6.8.1 Piezoelectricidad	298
6.8.2 Piroelectricidad	299
<b>6.9 Propiedades magnéticas</b>	<b>299</b>
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>302</b>

## CAPÍTULO 7 CRISTALOGRAFÍA DE RAYOS X

<b>7.1 Espectros de rayos X</b>	<b>304</b>
<b>7.2 Efectos de difracción y la ecuación de Bragg</b>	<b>306</b>
7.2.1 Método de Laue	308
7.2.2 Otros métodos con monocristales	310
<b>7.3 Método del polvo</b>	<b>311</b>
7.3.1 Difractómetro de polvo de rayos X	316
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>318</b>

## CAPÍTULO 8 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES

<b>8.1 Naturaleza de la luz</b>	<b>320</b>
8.1.1 Reflexión y refracción	320
8.1.2 Índice de refracción	320
<b>8.2 Reflexión total y ángulo crítico</b>	<b>321</b>
<b>8.3 Cristales isótropos y anisótropos</b>	<b>322</b>

<b>8.4 Luz polarizada</b>	<b>322</b>
<b>8.5 El microscopio de polarización</b>	<b>324</b>
8.5.1 Examen microscópico de minerales y rocas	325
<b>8.6 Cristales uniaxiales</b>	<b>326</b>
8.6.1 Cristales uniaxiales entre polaroides cruzados	328
8.6.2 Láminas auxiliares	330
8.6.3 Cristales uniaxiales en luz polarizada convergente	331
8.6.4 Determinación del signo óptico	332
8.6.5 Signo de alargamiento	333
8.6.6 Absorción y dicroísmo	333
<b>8.7 Cristales biaxiales</b>	<b>334</b>
8.7.1 La indicatriz biaxial	334
8.7.2 Cristales biaxiales en luz polarizada convergente	335
8.7.3 Determinación del signo óptico de un cristal biaxial	337
8.7.4 Orientación óptica en los cristales biaxiales	338
8.7.5 Dispersión de los ejes ópticos	338
8.7.6 Absorción y pleocroísmo	339
<b>8.8 Propiedades ópticas de los minerales opacos</b>	<b>339</b>
Referencias y lecturas sugeridas	340

## CAPÍTULO 9 DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD MINERAL

---

<b>9.1 Diagrama de fases del agua</b>	<b>342</b>
<b>9.2 Estabilidad, energía de activación y equilibrio</b>	<b>342</b>
<b>9.3 Componentes</b>	<b>344</b>
<b>9.4 Introducción a la termodinámica</b>	<b>344</b>
9.4.1 Regla de las fases de Gibbs	347
<b>9.5 Ejemplos de diagramas de estabilidad mineral (o de fases)</b>	<b>348</b>
9.5.1 Diagramas de un componente	348
9.5.2 Diagramas de dos componentes	351
9.5.3 Diagramas de tres o más componentes	357
9.5.4 Diagramas para reacciones minerales en presencia de H <sub>2</sub> O o CO <sub>2</sub>	365
9.5.5 Diagramas Eh-pH	366
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>368</b>

## ÍNDICE ALFABÉTICO I-1



# CAPÍTULO 1

---

---

# INTRODUCCIÓN

---

---

1.1 DEFINICIÓN DE MINERAL	2
1.2 HISTORIA DE LA MINERALOGÍA	4
1.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LOS MINERALES	14
1.4 NOMBRE DE LOS MINERALES	14
1.5 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS DE MINERALOGÍA	15
REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS	15

La mineralogía es el estudio de las sustancias cristalinas que se encuentran en la naturaleza, es decir los minerales. Todo el mundo está familiarizado con los minerales, ya que éstos se encuentran presentes en las rocas de las montañas, en la arena de la playa y en el suelo de nuestro jardín. Menos familiares, pero también constituidos por minerales, son los meteoritos y la superficie lunar. Las gemas son excepcionalmente hermosas y generalmente representantes de gran duración del mundo mineral. Un conocimiento sobre qué son los minerales, cómo se han formado y dónde se encuentran es básico para la comprensión de los minerales que son responsables de nuestra actual cultura tecnológica. Todos los artículos inorgánicos que se comercializan, si no son minerales en sí mismos, son de origen mineral.

### 1.1 DEFINICIÓN DE MINERAL

Aunque es difícil formular una breve definición de la palabra mineral, se suele aceptar la siguiente:

*Un mineral es un sólido homogéneo por naturaleza con una composición química definida (pero generalmente no fija) y una disposición atómica ordenada. Normalmente se forma mediante un proceso inorgánico.*

Un análisis actualizado de esta definición ayudará a su comprensión. Cuando decimos *por naturaleza* estamos distinguiendo entre sustancias formadas por procesos naturales y sustancias sintetizadas en el laboratorio. Los laboratorios industriales y de investigación producen rutinariamente equivalentes sintéticos de muchos productos naturales incluyendo piedras preciosas de valor, como pueden ser las esmeraldas, rubíes, y diamantes. Desde principios del siglo XX, los estudios mineralógicos se han apoyado mucho en los resultados obtenidos de los sistemas sintéticos, en los cuales los productos obtenidos son exactamente iguales a los producidos naturalmente. Esta práctica es generalmente aceptada, aun cuando esté en desacuerdo con la estricta interpretación del *proceso natural*. En este libro llamaremos *mineral* a una sustancia formada por un proceso natural, palabra que irá acompañada por el adjetivo *sintético* si la sustancia se ha producido mediante técnicas de laboratorio. Podemos ahora preguntarnos cómo hemos de referirnos al  $\text{CaCO}_3$  (calcita) que a veces se forma en las canalizaciones de agua en una ciudad, formando depósitos concéntricos. La precipitación en el agua de este material es un proceso natural, pero sucede en un sistema realizado por el hombre. La mayoría de los mineralogistas se refieren a este material por su nombre mineral, calcita, como si no existiese una contribución humana en su formación.

La definición de mineral también establece que un mineral es un *sólido homogéneo*. Esto significa que consta de una única sustancia sólida que no puede ser subdividida físicamente en simples componentes químicos. La determinación de homogeneidad es difícil porque está relacionada con la escala en la cual se define. Por ejemplo, una muestra que parece homogénea a simple vista puede ser heterogénea, compuesta por varios materiales, cuando la miramos mediante un microscopio de alta resolución. La cualidad de sólido excluye a los gases y a los líquidos. Por tanto  $\text{H}_2\text{O}$  en forma de hielo en un glaciar es un mineral, pero el agua en sí misma no lo es. De la misma manera el mercurio líquido, que se encuentra en algunos depósitos de mercurio, no debe ser considerado como un mineral si aplicamos estrictamente la definición de éste. Sin embargo, en una clasificación de los materiales naturales todas las sustancias que se comportan como minerales en química se denominan *mineraloides* y se encuentran dentro del dominio del mineralogista.

El hecho de que un mineral deba tener una *composición química definida* implica que éste puede expresarse mediante una fórmula química específica. Por ejemplo, la composición química del cuarzo se expresa de la forma  $\text{SiO}_2$ . El cuarzo sólo contienen a los elementos químicos, silicio y oxígeno, y tiene una fórmula definida. Por lo tanto, el cuarzo se considera con frecuencia como una sustancia pura. Sin embargo, la mayoría de los minerales no tienen una composición perfectamente definida. La dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , no es siempre un carbonato puro de Ca y Mg, ya que puede contener cantidades considerables de Fe y Mn en lugar de Mg. Como estas cantidades varían, se dice que la composición de la dolomita oscila entre ciertos límites, y por lo tanto, *no es fija*. Esta oscilación en la composición puede expresarse mediante una fórmula que siga teniendo la misma proporción entre los átomos (o más exactamente iones) que la  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  pura, en la que se cumple la proporción  $\text{Ca} : \text{Mg} : \text{CO}_3 = 1 : 1 : 2$ . Esto nos permite expresar la fórmula de la dolomita de una manera más general, es decir:  $\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Mn})(\text{CO}_3)_2$ .

Una *disposición atómica ordenada* indica la existencia estructural de un entramado de átomos (o iones) ordenados según un modelo geométrico regular. Así, pues, como éste es el criterio necesario para considerar un sólido cristalino, los minerales son cristalinos. Los sólidos, como por ejemplo el vidrio, que carecen de una disposición atómica ordenada reciben el nombre de *amorfos*. Existen varios sólidos naturales *amorfos*. Algunos ejemplos son: el vidrio volcánico (no clasificado como mineral por su composición altamente variable y falta de estructura ordenada atómica), la limonita (un hidróxido de hierro) y el alofán (un hidrosilicato de alumi-



**FIGURA 1.1** Exploración en busca de yacimientos con un palo en forma de horquilla (A) y abriendo pozos (B) en el siglo XV. (De Agrícola, *De Re Metallica*, traducido al inglés por Dover Publications, New York, 1950.)

nio); también varios minerales metamórficos como la microcita, la gadolinita y la alanita (en minerales metamórficos la cristalinidad original fue destruida, en varios grados, por la variación emitida por elementos radiactivos presentes en la estructura original). Tanto éstos como el agua líquida y el mercurio, que también carecen de un orden interno, se clasifican como mineraloides.

De acuerdo con la definición tradicional, un mineral *se forma mediante procesos inorgánicos*. En la definición dada de mineral, hemos utilizado el adverbio *normalmente* para poder incluir dentro del dominio de la mineralogía los pocos compuestos producidos orgánicamente que se acoplan a la definición de mineral. El ejemplo más destacado es el del carbonato cálcico de las conchas de los moluscos. La concha de una ostra y la perla que ésta puede llevar en su interior están en su mayor parte constituidas por aragonito, que es idéntico al mineral formado por procesos inorgánicos.

Aunque diversas formas de  $\text{CaCO}_3$  (calcita, aragonito, vaterita) y monohidrocalcita,  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , son los minerales biogénicos (“minerales formados por organismos”) más

comunes, existen muchas otras especies biogénicas. El opal (una forma amorfa del  $\text{SiO}_2$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), varios fosfatos, algunos sulfatos, óxidos-Mn y piritita ( $\text{FeS}_2$ ), así como el azufre elemental, son ejemplos de minerales que pueden ser precipitados por organismos (véase Lowenstam, 1981). El cuerpo humano también produce minerales esenciales. El apatito,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$  es el principal constituyente de huesos y dientes. El cuerpo puede también producir concreciones de materia mineral (cálculos) en el sistema urinario. Estos cálculos consisten fundamentalmente en fosfatos de calcio (tales como el hidroxapatito, el carbonato-apatito y la whitlockita), oxalatos de calcio, que son muy raros en el mundo mineral, y los fosfato de magnesio (véase Gibson, 1974).

Sin embargo, el petróleo y el carbón, que son frecuentemente considerados como combustibles minerales, están excluidos de esta definición, pues aunque se forman por procesos naturales, no tienen composición química definida ni distribución atómica ordenada. Sin embargo, en los lechos de carbón que han sido sometidos a altas temperaturas se han



**FIGURA 1.2** Retrato de Niels Stensen. (En su forma latinizada Nicolaus Steno.) Steno nació en Copenhague, Dinamarca, en 1638 y murió en el año 1686. (De G. Scherz, Steno, Geological Papers, Odense University Press, 1969.)

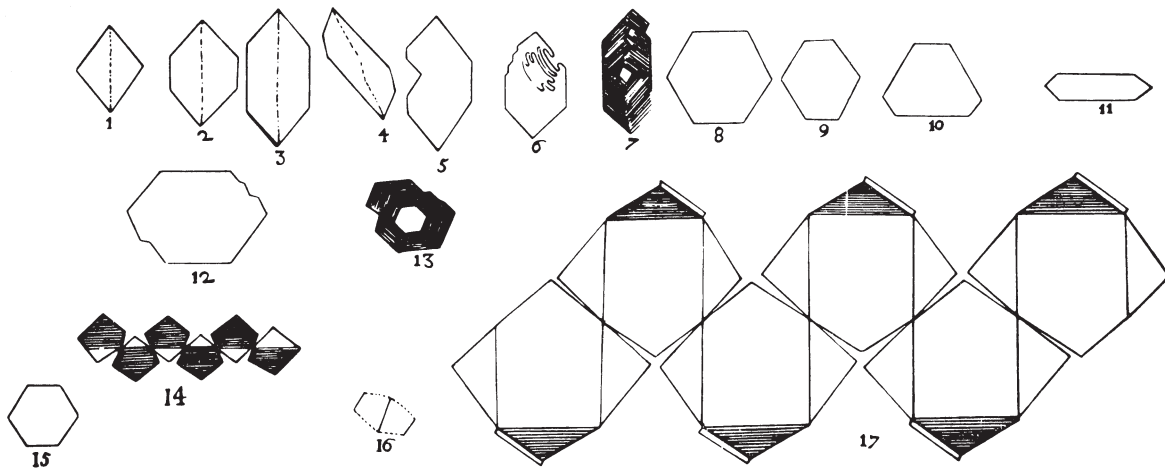
eliminado los hidrocarburos volátiles y el carbón ha cristalizado. Este residuo mineral es el grafito.

## 1.2 HISTORIA DE LA MINERALOGÍA

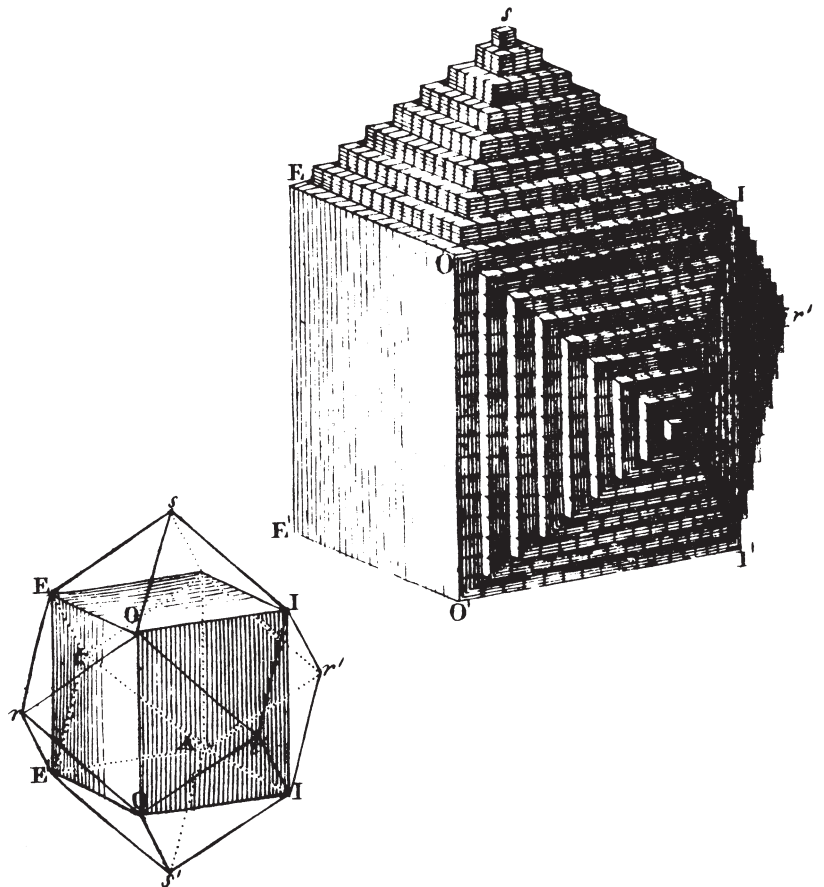
Aunque es imposible trazar sistemáticamente el desarrollo de la mineralogía en unos pocos párrafos, sí podemos señalar los hechos más importantes de este desarrollo. El surgir de la mineralogía como una ciencia es relativamente reciente, pero la práctica de las artes mineralógicas es tan antigua como la civilización humana. En las pinturas rupestres reali-

zadas por hombres primitivos ya se utilizaron pigmentos naturales hechos de hematite roja y óxido de manganeso negro, y las herramientas de pedernal eran posesiones preciosas durante la Edad de Piedra. Las pinturas funerarias del Valle del Nilo, realizadas hace casi 5000 años, nos muestran a unos laboriosos artesanos pesando malaquita y metales preciosos, fundiendo menas de mineral y elaborando delicadas gemas de lapislázuli y esmeralda. Cuando la Edad de Piedra dio paso a la Edad de Bronce, se buscaron otros minerales de los que poder extraer los metales.





**FIGURA 1.3** Dibujos de Steno de diversos cristales de cuarzo y hematita que ilustran la constancia entre los ángulos de los cristales de diferentes estructuras. (De: J. J. Schafkranovski, *Die Kristallographischen Entdeckungen N. Stenens*, en *Steno as Geologist*. Odense University Press, 1971.)



**FIGURA 1.4** Dibujo del concepto desarrollado por R. J. Haüy (1743-1826) de pequeños bloques de construcción idénticos que son el sostén de la forma externa de los cristales. En esta figura se muestra el desarrollo de un dodecaedro de granate. (De: G. M. Marr, *Geschichte der Kristallkunde*, reimpression de Sändig, Walluf, Alemania, 1970).

Al filósofo griego Theophrastus (372-287 a. C.) le debemos el primer trabajo escrito sobre minerales, y también debemos nombrar a Plinio, que 400 años después recopiló el saber mineralógico de su tiempo. Durante los 1300 años siguientes, los pocos trabajos que se publicaron sobre minerales contenían más fábulas y ficción popular que información verídica. Si hubiera que seleccionar un suceso que señalase el nacimiento de la mineralogía como ciencia, éste sería la publicación en el año 1556 del libro *De Re Metallica* escrito por el médico alemán, Georgius Agricola. Este libro relata con todo detalle la práctica de la minería de su época e incluye la primera recopilación de minerales. Este libro, originalmente en latín, fue traducido al inglés<sup>1</sup> en 1912 por el que fue Presidente de los Estados Unidos, Herbert Hoover, y su esposa, Lou Henry Hoover. Una ilustración de este libro se reproduce en la Fig. 1.1. En 1669 Nicolas Steno contribuyó notablemente al desarrollo de la cristalografía con su estudio de los cristales de cuarzo. (Un retrato de Nicolas Steno se reproduce en la Fig. 1.2.) Observó que a pesar de las diferencias de procedencia, tamaño, o constitución, los ángulos entre las caras correspondientes eran constantes (véase Fig. 1.3). Pasó más de una centuria antes de que se produjera una nueva contribución. En 1780 Carangeot inventó un mecanismo (goniómetro de contacto) para la medida de ángulos interfaciales de un cristal (véase Fig. 1.5a). En 1783 Romé de L'Isle realizó medidas angulares en los cristales que confirmaron el trabajo de Steno y formuló la ley de la constancia del ángulo interfacial. En el año siguiente, 1784, René J. Haüy demostró que los cristales estaban contruidos por acumulación de pequeños bloques idénticos, a los que él llamó moléculas integrales (véase Fig. 1.4). El concepto de moléculas integrales sobrevive casi en su sentido original en la cristalografía moderna en las llamadas células unitarias. Más tarde (1801) Haüy, por medio de un estudio de cientos de cristales, desarrolló la teoría de los índices racionales para las caras de un cristal.

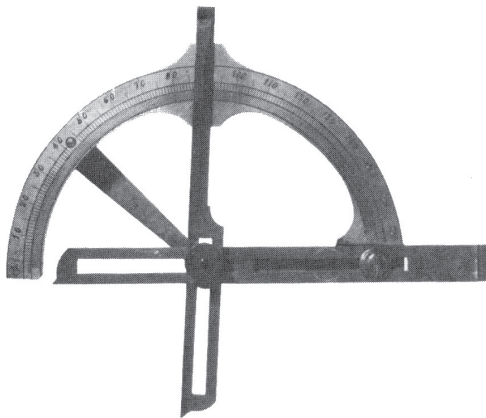
A principios del siglo diecinueve se sucedieron rápidos avances en el campo de la mineralogía. En 1809 Wollaston inventó el goniómetro de reflexión, que permitió una alta exactitud y medidas precisas de las posiciones de las caras del cristal. El goniómetro de contacto sirvió para suministrar los datos necesarios para el estudio de la simetría del cristal; el goniómetro de reflexión dio mayor exactitud a las medidas, tanto las de los cristales artificiales como las de los formados por un proceso natural (véase Fig. 1.5c y d). Estos datos hicieron de la cristalografía una ciencia exacta. Entre

1779 y 1848 Berzelius, un químico suizo, y sus discípulos estudiaron la química de los minerales y desarrollaron los principios de la actual clasificación química de los mismos.

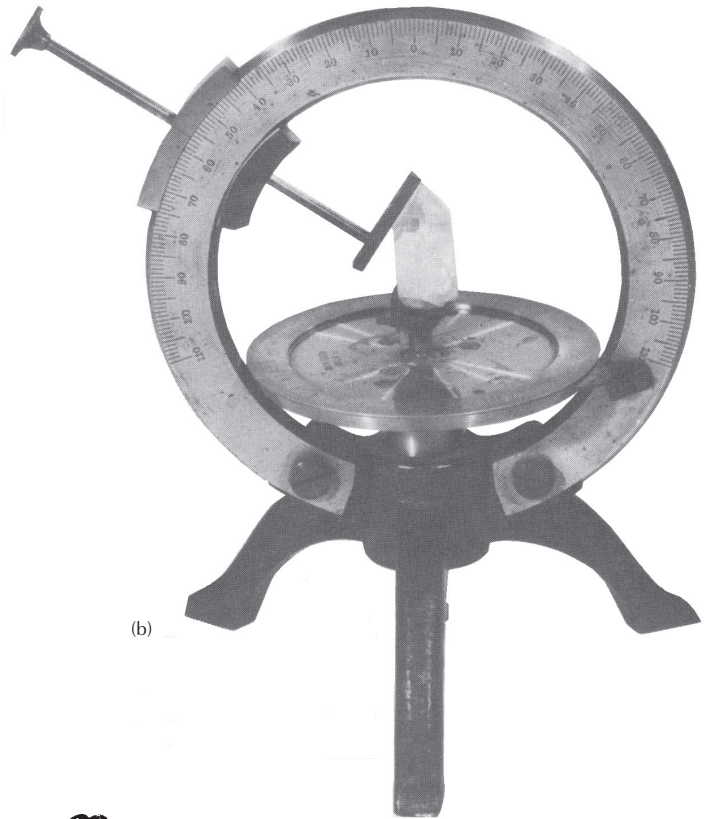
En 1815, el naturalista francés Cordier, cuyo trabajo en mineralogía le valió el que se diera su nombre a un mineral, la *cordierita*, observó a través de su microscopio fragmentos de mineral triturado sumergidos en agua. De este modo se inició el “método de inmersión” que otros, más avanzado el siglo, convirtieron en una técnica importante para el estudio de las propiedades ópticas de los fragmentos minerales. La utilidad del microscopio en el estudio de los minerales se acrecentó mucho gracias a la invención, hecha en 1828, por el escocés William Nicol, de un dispositivo de polarización que permitió el estudio sistemático del comportamiento de la luz en las sustancias cristalinas. El microscopio de luz polarizada se hizo, y es todavía, un instrumento determinante y muy importante en los estudios mineralógicos. Un modelo de finales del siglo XIX viene ilustrado en la Fig. 1.6. En la última parte del siglo diecinueve, Ferodov, Schoenflies y Barlow, trabajando independientemente y casi al mismo tiempo, desarrollaron las teorías para la simetría interna y la ordenación en el interior de los cristales que fueron los fundamentos para el trabajo posterior en la cristalografía de rayos X.

El descubrimiento con más repercusión del siglo veinte debe ser atribuido a Max von Laue, de la Universidad de Munich. En 1912 en un experimento efectuado por Friedrich y Knipping por indicación de von Laue, se demostró que los cristales podían difractar los rayos X. De esta forma se probó por primera vez la distribución ordenada y regular de los átomos en un material cristalino. Casi inmediatamente la difracción de rayos X se convirtió en un método imprescindible para el estudio de los minerales y de otras sustancias cristalinas, y en 1914 fueron publicadas por W. H. Bragg y W. L. Bragg (véanse sus fotografías en la Fig. 1.7) en Inglaterra las primeras determinaciones de la estructura de un cristal. El equipo moderno de difracción de rayos X asociado a computadores especialmente diseñados ha hecho posible la determinación relativamente rápida de las estructuras altamente complejas de un cristal. El advenimiento del microensayo electrónico al comienzo de la década de 1960, aplicado al estudio de la química de los minerales a nivel de microescala, es otro instrumento muy importante que ahora se utiliza rutinariamente para el estudio de la química mineral, compuestos sintéticos y vidrios. Las microsondas electrónicas (véanse Figs. 1.8 y 1.9) pueden promocionar análisis exactos de múltiples elementos de materiales sólidos en un tamaño de grano del orden de un micrómetro (0,001 mm). La mayoría de los análisis de minerales se realizan ahora por medio

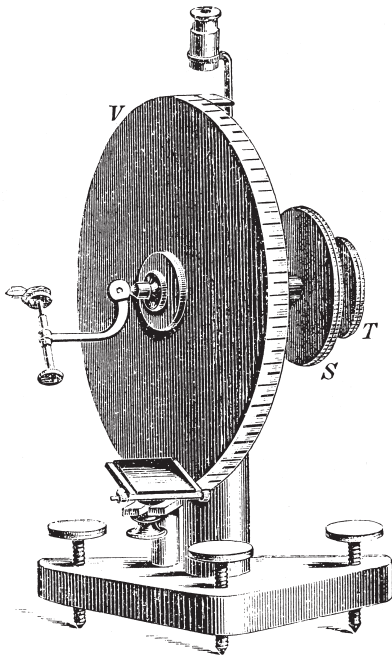
<sup>1</sup> Publicado en 1950 por Dover Publications, Inc., New York.



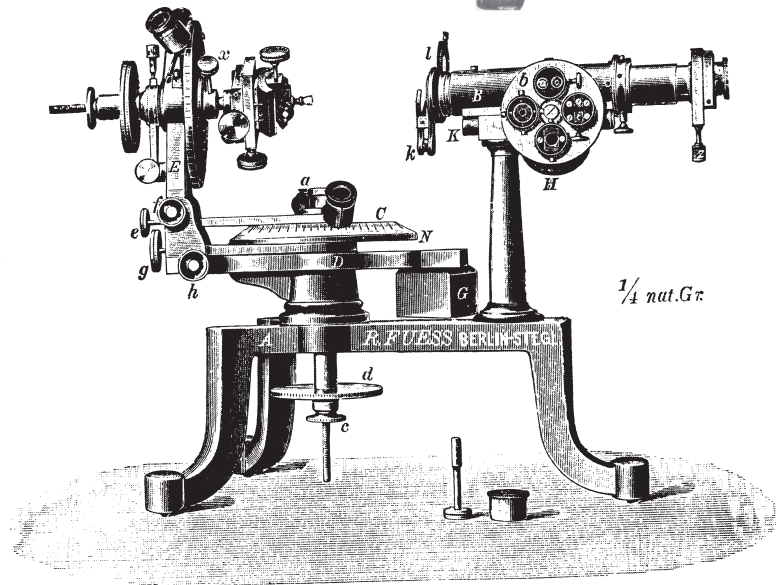
(a)



(b)

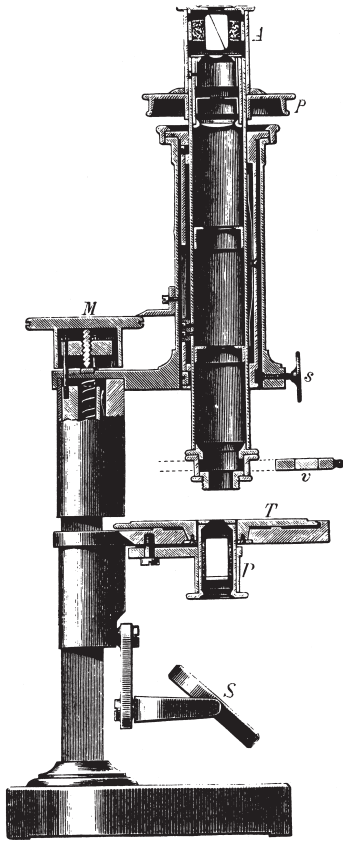


(c)

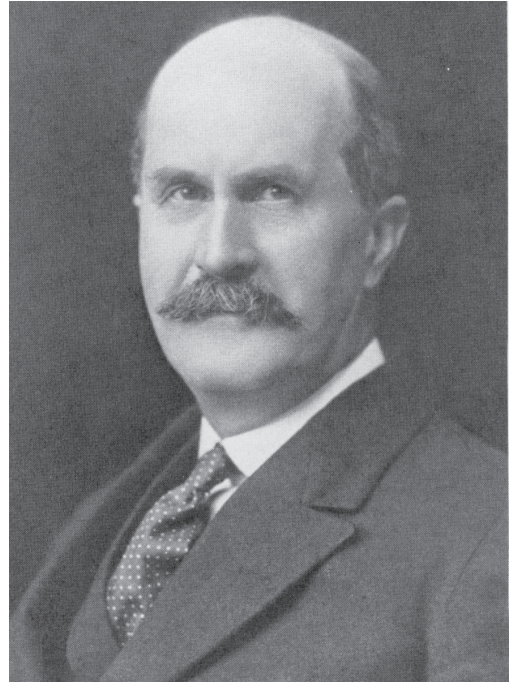


(d)

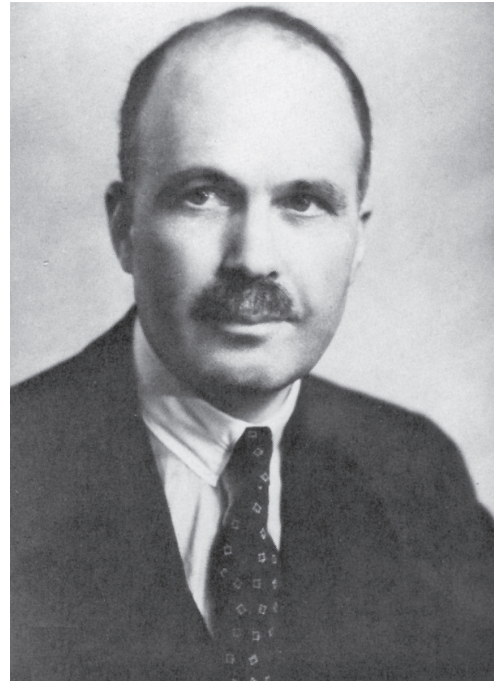
**FIGURA 1.5** Ejemplos de instrumentos utilizados para la medida de ángulos formados por las caras de un cristal. (a) Goniómetro de contacto de latón del tipo Carangeot. Este fue utilizado en 1797 en la Universidad de Harvard (véase Frondel, 1983). (b) Goniómetro de contacto de dos círculos basado en el diseño de Víctor Goldschmidt en 1896. (c) Primer goniómetro de reflexión tal como lo inventó W. H. Wollaston en 1809. (De G. Tschermak y F. Becke, *Lehrbuch der Mineralogie*, 1921, Hölder-Pichler-Tempsky, Viena.) (d) Goniómetro de reflexión de dos círculos tal como se conocía hacia finales del siglo diecinueve. (De P. Groth, *Physikalische Krystallographie*, 1895, Leipzig.) Compárese con la Fig. 2.40.



**FIGURA 1.6** Microscopio de luz polarizada utilizado a mediados del siglo diecinueve. (De G. Tschermak y F. Becke, 1921 *Lehrbuch der Mineralogie*, Hölder-Pichler-Tempsky, Viena.) Compárese con la Fig. 8.10.

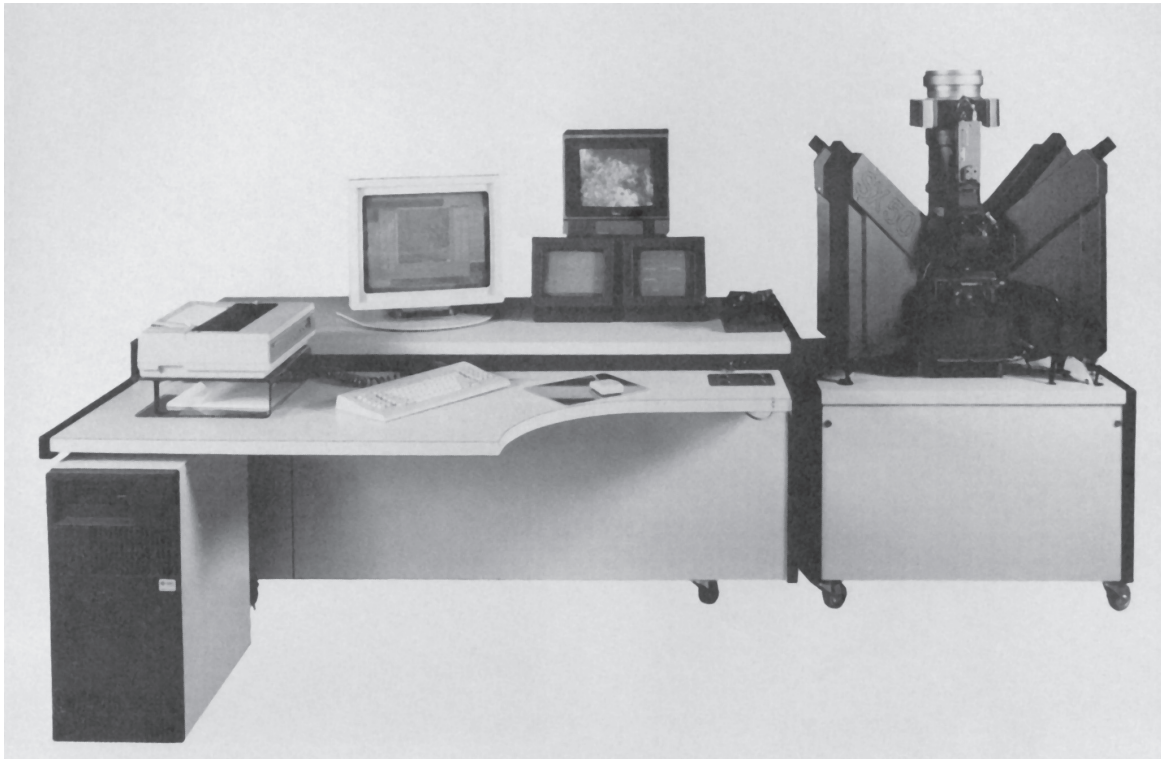


(a)

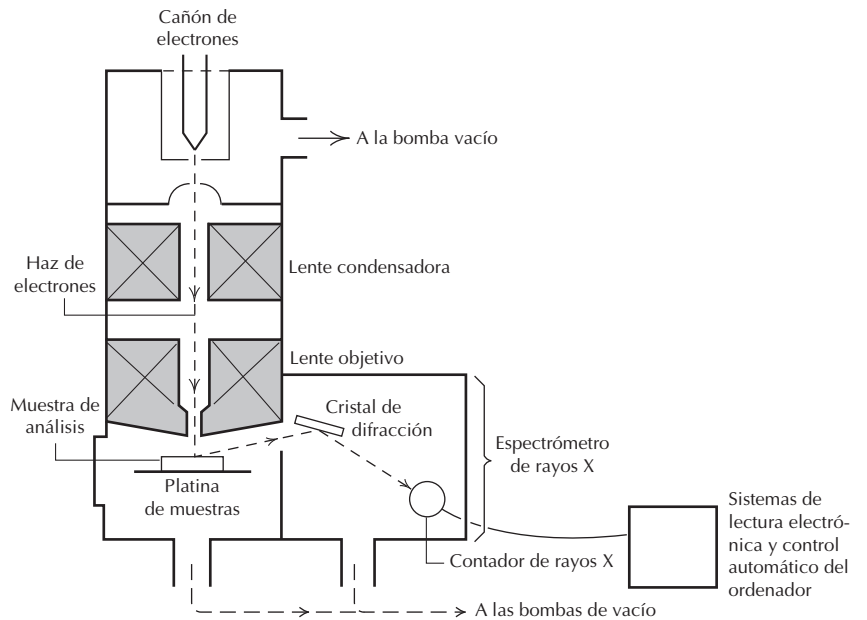


(b)

**FIGURA 1.7** (a) Retrato de Sir William Henry Bragg (1862-1942) y (b) de su hijo Sir William Lawrence Bragg (1890-1971). Padre e hijo recibieron el Premio Nobel de Física en 1915. Ambos eran famosos por el resultado de sus investigaciones en el campo de la estructura de un cristal mediante métodos de rayos X. (a, de Godfrey Argent, London, fotografía realizada por Walter Stoneman; b, del Times Newspapers, Ltd., London.)

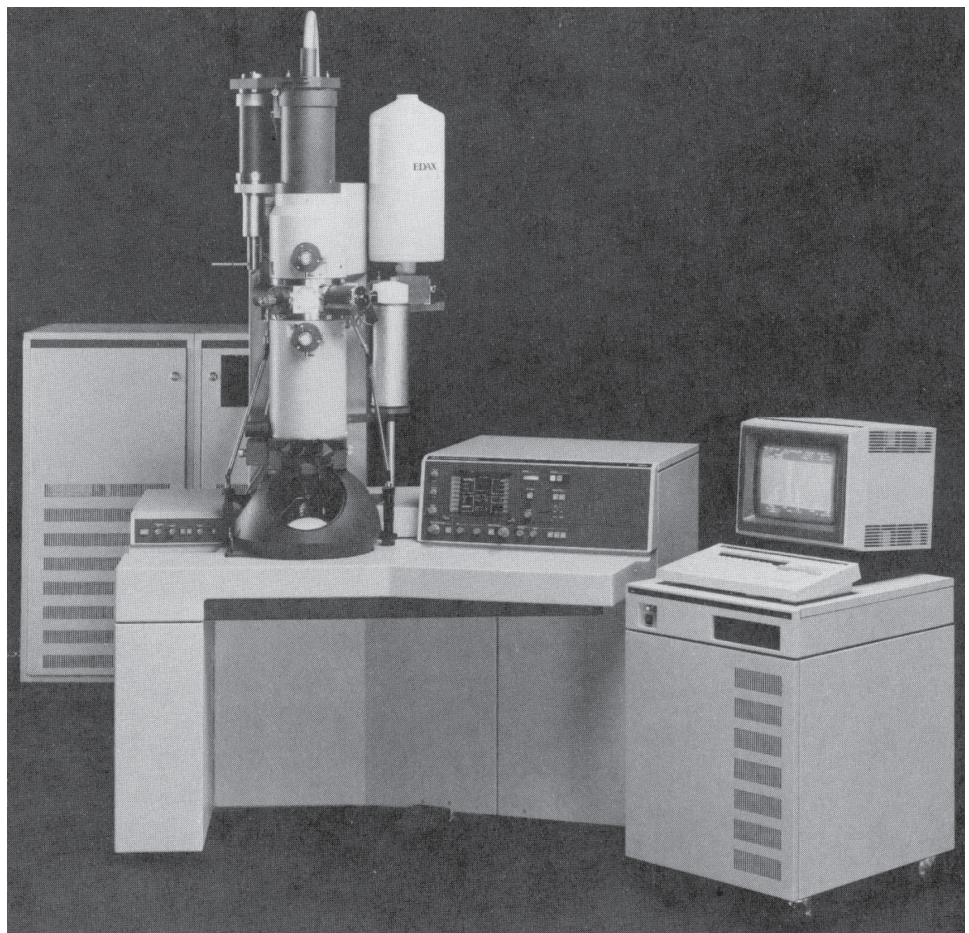


**FIGURA 1.8** Microsonda electrónica automatizada por ordenador con la columna del haz de electrones y los espectrómetros de rayos X a la derecha; el control del ordenador y los sistemas de lectura están a la izquierda. Este es un aparato Camebax SX 50, construido por Cameca SA, Courbevoie, Francia. (Cortesía de Cameca Instruments Inc., Stamford, Conn. EE.UU.)



**FIGURA 1.9** Sección transversal esquemática de la columna óptica de electrones y del espectrómetro de rayos X de una microsonda electrónica.

**FIGURA 1.10** Un microscopio electrónico de transmisión, Philips System CM12. La cabina al fondo a la izquierda es el generador de alto voltaje; la gran estructura vertical es la columna de electrones con paneles de control a ambos lados y una pantalla con visor al nivel de la mesa; esta pantalla se usa para recibir imágenes del microscopio electrónico de transmisión (TEM) y observa diagramas de difracción electrónica. En medio de la columna de electrones y ligeramente a la derecha está el portador de muestras. A la derecha de la columna está adosado un detector de rayos X de energía dispersiva (EDX) provisto de un dewar de nitrógeno líquido para el enfriamiento. La cabina a la derecha de la fotografía con el monitor de TV es el analizador (para análisis químicos). (Cortesía de Philips Electronic Instruments, Inc. Mahwah, N. J.)

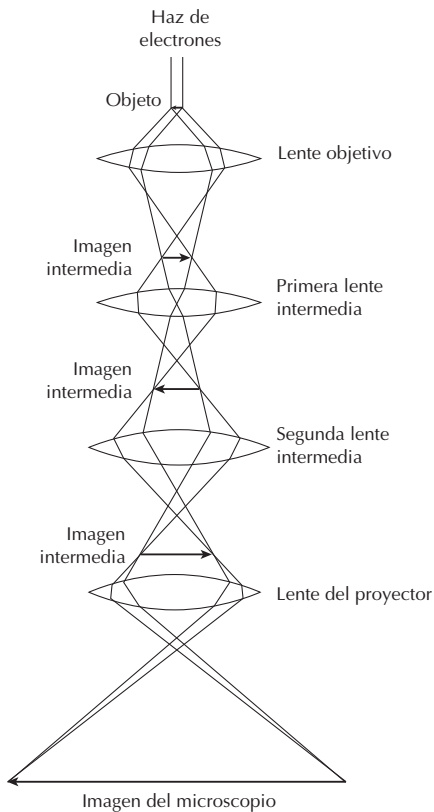


de microsondas electrónicas, no sólo a causa de la ventaja del foco fino del haz de electrones del instrumento, sino también porque los análisis pueden realizarse *in situ* sobre granos de mineral específico en secciones pulidas de minerales y rocas. Con ello se elimina el laborioso proceso de separación y concentración del mineral, requisito indispensable en otras técnicas analíticas de minerales (véase Capítulo 5 para una exposición posterior de estas técnicas).

Desde 1970 otro instrumento de haz electrónico, que puede aumentar la arquitectura interna de los minerales en millones de veces, ha producido imágenes visuales de gran potencia de las estructuras atómicas. Este instrumento, el microscopio electrónico de transmisión, viene ilustrado en la Fig. 1.10 y una representación esquemática del proceso de aumento de un objeto en su imagen final extraordinariamente amplificada puede verse en la Fig. 1.11. El llamado microscopio electrónico de transmisión de alta resolución

(HRTEM en su sigla inglesa) permite el estudio de materiales cristalinos en una resolución que se aproxima a la escala de las distancias atómicas (véase P. R. Buseck, 1983). La técnica puede producir imágenes proyectadas en dos dimensiones de estructuras cristalinas tridimensionales. Estas imágenes muestran que muchos minerales poseen distribuciones estructurales internas que se extienden periódicamente al infinito (esto significa perfección repetitiva); un ejemplo de esta estructura “perfecta” viene ilustrada en la imagen de la Fig. 1.12 obtenida con el HRTEM para el mineral turmalina, químicamente complejo. Las imágenes del HRTEM demuestran también que los minerales pueden contener defectos que son desviaciones de las estructuras idealizadas o “perfectas” (véase Figs. 3.52 y 3.53).

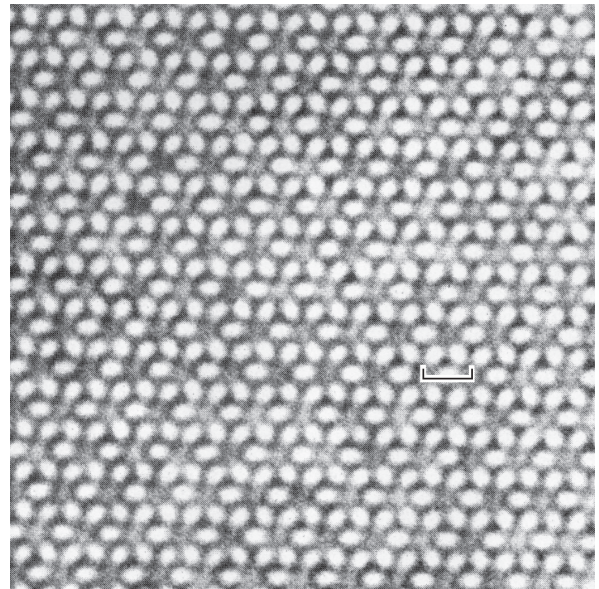
El campo de la mineralogía abarca ahora un área muy amplia de estudio que incluye rayos X, electrones y difracción de neutrones por minerales, síntesis de minerales,



**FIGURA 1.11** Sección esquemática transversal de la columna de un microscopio electrónico de transmisión mostrando la trayectoria de rayos que forman la imagen estructural. Las cuatro lentes son electromagnéticas.

física de cristales, evaluación de la estabilidad termodinámica de minerales, petrografía (estudio de rocas y minerales en secciones delgadas), petrología (estudio de rocas), petrología experimental y aspectos de metalurgia y cerámica. Como resulta difícil predecir qué contribuciones (realizadas últimamente) a la ciencia de la mineralogía serán más duraderas e importantes, hemos relacionado en la Tabla 1.1 a los galardonados con la Medalla Roebling y algunos de sus principales trabajos de investigación. Esta lista ilustra la diversidad de las contribuciones profesionales reconocidas internacionalmente y podemos suponer razonablemente que incluye a aquellos mineralogistas que los futuros historiadores considerarán como los gigantes de esta especialidad en nuestro tiempo.

La medalla “Roebling” se estableció en 1937 por la Sociedad de Mineralogía de América en memoria del Coronel Washington A. Roebling (1937-1926), quien había donado a



**FIGURA 1.12** Imagen de la estructura de turmalina obtenida con un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM). (De Lijima, S., Cowley, J.M. y Donnay, G., 1973, High resolution electron microscopy of tourmaline crystals. *Tschermaks Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, V. 20, pág. 216-244.) Las áreas blancas de la fotografía corresponden a regiones de baja densidad electrónica en la estructura de la turmalina. El diagrama de tipo senario es la imagen del anillo  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$  de la turmalina (compárese con la Fig. 13.41). La escala de barras que se muestra representa 15 angstroms.

la Sociedad en 1926 una importante ayuda económica. El coronel Roebling fue el diseñador de puentes colgantes tan famosos como el del río Niágara (sobre las cataratas del mismo nombre), el del río Allegheny en Pittsburgh, el del río Ohio en Cincinnati y el de Brooklyn sobre East River de la ciudad de Nueva York. Toda su vida mantuvo un profundo interés en el estudio de los minerales y la medalla Roebling constituye el máximo galardón que la Sociedad de Mineralogía puede conceder a los investigadores de todo el mundo en esta especialidad. Los discursos de presentación y aceptación de la medalla Roebling pueden encontrarse en la revista *The American Mineralogist*.

En 1927 John Roebling, hijo de W. A. Roebling, donó la colección de minerales de su padre, formada por unos 1600 ejemplares al Museo Nacional de Historia Natural (Smithsonian Institution) de Washington, D. C. Esta colección, llamada “colección de minerales de Washington A. Roebling” fue indudablemente en su tiempo una de las mayores y más hermosas colecciones privadas. Esta adquisición, junto con otra colección de unos 9100 ejemplares (colección Canfield),

TABLA 1.1 Galardonados con la medalla Roebling concedida por la sociedad mineralógica de América.		
Año de la concesión	Receptor e Institución a la que pertenece	Ejemplos de contribuciones sobresalientes en mineralogía
1937	Charles Palache, Harvard University	Estudios goniométricos en cristalografía y paragénesis mineral; minerales de <i>Franklin Furnace</i> , N.J.
1938	Waldemar T. Schaller, U.S. Geological Survey	Mineralogía química; cristalografía y paragénesis de minerales de pegmatita.
1940	Leonard James Spencer, British Museum (Natural History)	Sistemática de minerales; editor durante largo tiempo del <i>Mineralogical Magazine</i> y <i>Mineralogical Abstracts</i>
1941	Esper S. Larsen, Jr., Harvard University	Mineralogía y petrología; determinación de propiedades ópticas de minerales no opacos
1945	Edward H. Kraus, University of Michigan	Presencia y origen de minerales, formas cristalográficas; desarrollo de aparatos para ensayos minerales
1946	Clarence S. Ross, U.S. Geological Survey	Petrografía y petrología, particularmente minerales de arcilla; técnicas microscópicas, geoquímica de depósitos de menas
1947	Paul Niggli, Technische Hochschule, Zurich	Cristalografía y estructura de minerales; rocas ígneas y metamórficas; minerales de los Alpes suizos
1948	William Lawrence Bragg, Cavendish Laboratory, University of Cambridge	Determinaciones de estructura cristalina mediante técnicas de difracción de rayos X; junto con su padre William Henry Bragg recibió en 1915 el Premio Nobel de Física
1949	Herbert E. Merwin, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution	Óptica cristalina; caracterización de fases sintéticas, transparentes y opacas
1950	Norman L. Bowen, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution	Aplicación de datos físico-químicos experimentales y conceptuales a problemas petrológicos
1952	Frederick E. Wright, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution	Propiedades ópticas de minerales; diseño de un microscopio petrográfico mejorado y placas de ensayo
1953	William F. Foshag, U.S. National Museum	Caracterización de nuevos minerales; minerales de los Estados Unidos y México; gemología
1954	Cecil Edgar Tilley, University of Cambridge	Aplicación de principios físico-químicos al estudio de conjuntos minerales en rocas metamórficas e ígneas
1955	Alexander N. Winchell, University of Wisconsin	Evaluación de los principales grupos de silicatos en la formación de rocas; libros de texto sobre mineralogía óptica
1956	Arthur F. Buddington, Princeton University	Estudios petrológicos cuantitativos de muchos tipos de rocas y depósitos de menas
1957	Walter F. Hunt, University of Michigan	Mineralogía; editor durante 35 años de <i>The American Mineralogist</i>
1958	Martin J. Buerger, Massachusetts Institute of Technology	Cristalografía estructural; desarrollo de técnicas de rayos X en monocristales; libros de texto de cristalografía
1959	Felix L. Machatschki, University of Vienna	Distribución atómica de grupos principales de silicatos; sustitución atómica; relación entre estructura cristalina y paragénesis
1960	Thomas F. W. Barth, Oslo University	Petrología y cristalografía de rayos X; relaciones petrogenéticas de rocas en regiones de Noruega (por ej. región de Oslo) y Norteamérica
1961	Paul Ramdohr, University of Heidelberg	Microscopía de luz reflejada; mineralogía y génesis de depósitos de menas; texto importante de mineralogía de menas
1962	John W. Gruner, University of Minnesota	Cristalografía de rayos X sobre minerales de arcilla; mineralogía y petrología de formaciones de hierro; mineralización del uranio
1963	John Frank Schairer, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution	Estudios experimentales de equilibrios de fase de silicatos
1964	Clifford Frondel, Harvard University	Mineralogía estructural; caracterización de muchos nuevos minerales; mineralogía de uranio y torio; coautor del <i>Sistema de Dana</i>
1965	Adolph Pabst, University of California, Berkeley	Cristalografía de rayos X y mineralogía estructural; evaluación del estado metamórfico y de los silicatos laminares
1966	Max H. Hey, British Museum (Natural History)	Química mineral de zeolitas, grupo de cloritas y meteoritos; autor del <i>Index of Mineral Species</i> ; editor durante mucho tiempo del <i>Mineralogical Magazine</i>



TABLA 1.1 (Continuación)		
Año de la concesión	Receptor e Institución a la que pertenece	Ejemplos de contribuciones sobresalientes en mineralogía
1967	Linus Pauling, University of California, San Diego	Estructuras cristalinas y moleculares; química cuántica; teoría del enlace químico; autor del libro <i>The Nature of The Chemical Bond</i> ; galardonado con el Premio Nobel de Química en 1954 y el Premio Nobel de la Paz en 1962.
1968	Tei-ichi Ito, University of Tokio	Cristalografía estructural; polimorfismo; difracción de rayos X por el método del polvo
1969	Fritz Laves, Technische Hochschule, Zurich	Estructura y paragénesis de feldespatos; cristalografía de compuestos metálicos
1970	George W. Brindley, Pennsylvania State University	Cristalografía estructural de silicatos de capa; mineralogía de arcilla
1971	J. D. H. Donnay, Johns Hopkins University	Cristalografía; óptica cristalina; relaciones entre morfología y estructura; maclas; autor de <i>Crystal Data</i>
1972	Elburt F. Osborn, Bureau of Mines, U.S. Department of Interior	Petrología experimental en sistemas de formación de rocas; orientaciones de cristalización y diferenciación en magmas
1973	George Tunell, University of California, Santa Barbara	Investigaciones experimentales de minerales de menas oxidantes; evaluaciones físico-químicas de procesos de formación de menas
1974	Ralph E. Grim, University of Illinois, Champaign-Urbana	Mineralogía de arcillas; autor de <i>Clay Mineralogy</i> y <i>Applied Clay Mineralogy</i>
1975	O. Frank Tuttle, Stanford University	Petrología experimental; desarrollo del equipo de investigación hidrotérmica; estudios experimentales sobre el origen del granito
1975	Michael Fleischer, U.S. Geological Survey	Geoquímica de elementos trazadores; evaluación de nuevas especies minerales; presidente durante mucho tiempo de la comisión internacional sobre nuevos minerales; editor de la sección de mineralogía del <i>Chemical Abstracts</i>
1976	Carl W. Correns, University of Göttingen	Evaluaciones físico-químicas de sedimentología; oceanografía física y química; mineralogía de sedimentos
1977	Raimond Castaing, University of Paris	Inventor de la microsonda electrónica y pionero en la teoría del análisis cuantitativo; desarrollo de la microsonda de haz iónico
1978	James B. Thompson, Jr., Harvard University	Evaluación teórica de sistemas petrológicos; termodinámica de sistemas minerales; reacciones metamórficas en esquistos pelíticos; cristalografía de anfíboles
1979	William H. Taylor, Cavendish Laboratory, University of Cambridge	Cristalografía estructural; características estructurales de feldespatos, zeolitas y minerales silicato-alumínicos
1980	D. S. Korzhinskii, Academy of Sciences, Moscow	Aplicación de la termodinámica química a la petrología; autor de los textos <i>Physicochemical Basis for the Analysis of the Paragenesis of Minerals</i> y <i>Theory of Metasomatic Zoning</i>
1981	Robert M. Garrels, University of South Florida	Estudios teóricos de la formación de menas; termodinámica química de sistemas minerales; diagramas de fase para minerales a bajas temperaturas; evolución química del océano y la atmósfera; coautor de <i>Solutions, Minerals and Equilibria</i>
1982	Joseph V. Smith, University of Chicago	Cristalografía estructural de minerales constituyentes de rocas; zeolitas y feldespatos; mineralogía y petrología lunar; autor de <i>Feldspars</i> (2 volúmenes)
1983	Hans P. Eugster, Johns Hopkins University	Equilibrios sólido-fluido en sistemas hidrotérmicos; sedimentación química y química del agua, tal como los de los lagos de sal activa
1984	Paul B. Barton, Jr., U.S. Geological Survey	Petrología de menas; física y químicas de los procesos de formación de menas
1985	Francis J. Turner, University of California, Berkeley	Petrología metamórfica
1986	Edwin Roedder, U.S. Geological Survey	Inclusiones de fluidos en minerales
1987	Gerald V. Gibbs, Virginia Polytechnic Institute and State University	Fundamentos matemáticos de la cristalografía; aplicaciones de la teoría orbital molecular al enlace químico
1988	Julian R. Goldsmith, University of Chicago	Orden-desorden en feldespatos; equilibrios de fase en carbonatos; fraccionamiento de isótopos de oxígeno entre los minerales

TABLA 1.1 (Continuación)		
Año de la concesión	Receptor e Institución a la que pertenece	Ejemplos de contribuciones sobresalientes en mineralogía
1989	Helen D. Megaw, University of Cambridge	Estructura cristalina de rayos X de feldspatos; origen de la ferroelectricidad en los óxidos
1990	Sturges W. Bailey, University of Wisconsin	Estudios estructurales y de cristalografía de minerales de silicatos de capa
1991	E-an Zen, U.S. Geological Survey	Aplicaciones de la termodinámica a la petrología; régimen temperatura-presión del cinturón de los montes Apalaches; termobarometría ígnea
1992	Hatten S. Yoder, Jr., Geophysical Laboratory, Carnegie Institution	Petrología experimental y su aplicación a la paragénesis mineral; estudio del papel del agua en el metamorfismo y petrogénesis de las rocas ígneas; autor del libro <i>Generation of Basaltic Magma</i>
1993	Brian Mason, National Museum of Natural History (Smithsonian Institution)	Caracterización de un amplio intervalo de mineralogía terrestre y meteorítica; autor de los textos <i>Principles of Geochemistry</i> y de <i>Meteorites</i> ; coautor de <i>Mineralogy</i>

convirtió el fondo de minerales de la Institución Smithsonian en uno de los mejores del mundo (Roe A., 1990, “Washington A. Roebling, su vida y su colección de minerales”, *Mineralogical Record*, vol. 21, págs. 13-30).

### 1.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LOS MINERALES

Desde el principio de los tiempos, los minerales han jugado un papel importantísimo en la forma de vida de la humanidad. Y según se van sucediendo los siglos, este papel se hace más importante. Hoy en día dependemos de ellos de incontables maneras, desde para la construcción de rascacielos hasta para la manufactura de ordenadores. La civilización moderna depende y necesita de la prodigiosa utilidad de los minerales. Unos pocos minerales como el talco, el asbesto y el azufre se utilizan esencialmente tal como han sido extraídos sin sufrir apenas modificaciones, pero la mayoría de ellos deben someterse a un proceso industrial para obtener un material utilizable. Algunos de los productos más familiares de esta clase son: ladrillos, vidrios, cementos, escayola, y todo el gran número de metales que van desde el hierro hasta el oro. Las menas metálicas y los minerales industriales, son explotados en todos los continentes siempre que los minerales específicos estén lo suficientemente concentrados como para que su extracción sea económicamente rentable.

De acuerdo con el *Bureau of Mines* de los EE.UU. (*Geotimes*, 1989, vol. 34 pág. 19), “cada americano consume anualmente 40000 libras (1 libra = 453,6g) de nuevos minerales. Esto supone que cada nuevo niño nacido en los Estados Unidos consumirá durante toda su vida 795 libras de plomo (principalmente para baterías de automóvil, soldadu-

ras y componentes electrónicos); 757 libras de zinc (en aleaciones con el cobre para producir latón, recubrimientos protectores del acero y en compuestos químicos como caucho y pinturas); 1500 libras de cobre (especialmente en motores eléctricos, generadores, comunicaciones y cableados); 3593 libras de aluminio (para todo tipo de objetos como latas de bebidas, sillas plegables y aviación); 32700 libras de lingotes de hierro (para utensilios de cocina, automóviles buques y grandes edificios); 28213 libras de sal (para cocina, deshielo en carreteras de montaña y detergentes) y 1238101 libras de piedra, tierra, grava y cemento (para la construcción de carreteras, casas, escuelas, oficinas y factorías).” Una encomienda nacional sobre reciclaje disminuirá muchas de las estimaciones anteriores.

La localización de metales extraíbles y de los depósitos de minerales industriales, así como el origen, tamaño y pureza de esos yacimientos son del dominio de la geología económica. Pero también el conocimiento de la química, de la ocurrencia y de las propiedades físicas de los minerales son básicos para progresar en dicha economía.

### 1.4 NOMBRE DE LOS MINERALES

Los minerales se clasifican normalmente en función del principal componente químico (un anión o complejo aniónico) presente en el mineral en óxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos, fosfatos, etc. Esto es muy útil porque la mayoría de los minerales contiene sólo un anión principal. De todas formas, al nombrar un mineral no siempre se ha utilizado este esquema químicamente lógico.

La descripción detallada y la identificación de los minerales requiere frecuentemente técnicas altamente especializadas, como el análisis químico y la medida de propiedades físicas, como la densidad, las propiedades ópticas y los parámetros de rayos X que están relacionados con la estructura atómica de los minerales. Sin embargo, en la nomenclatura de minerales no hay una regla científica fija. A los minerales se les ha ido nombrando en función de alguna propiedad física, o según su aspecto químico, o se les ha puesto el nombre del lugar donde se les ha encontrado, o de un personaje famoso, de un mineralogista, o cualquier otra consideración que resultará apropiada. A continuación se exponen algunos ejemplos de nombres de minerales y se explica el porqué de su denominación.

Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) del latín, *albus* (blanco), en alusión a su color.

Rodonita ( $\text{MnSiO}_3$ ) del griego, *rhodon* (una rosa) en alusión a su color rosa característico.

Cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) ya que existe una gran cantidad de cromo en este mineral

Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) debido a sus propiedades magnéticas  
Franklinita ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ), de la localidad, Franklin, New Jersey, en donde es el mineral de zinc dominante.

Sillimanita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ), en honor del profesor Benjamin Silliman, de la Universidad de Yale (1779-1864).

Un comité internacional, la “Comisión para el estudio de minerales nuevos y sus nombres”, de la *International Mineralogical Association*, está ahora revisando las descripciones de los minerales nuevos y enjuicia si son apropiados los nombres de éstos; también estudia la caracterización científica de las especies minerales descubiertas recientemente. El *Glosario de especies minerales*, publicado en 1991 por Michael Fleischer (véase al final de este capítulo la referencia completa) relaciona los nombre recomendados internacionalmente para unos 3500 minerales distintos. En este texto se utilizan los nombres correspondientes de este lista.

## 1.5 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS DE MINERALOGÍA

El primer libro extenso en lengua inglesa sobre mineralogía, *A system of Mineralogy* fue el de James D. Dana, publicado en 1837. Desde entonces, y después de varias revisiones, sigue manteniéndose como un trabajo patrón de referencia. La última edición completa (la sexta) fue publicada en 1892 con suplementos en 1899, 1909, y 1915. Partes de la séptima edición, conocidas con el nombre de la *Dana's System of Mineralogy*, han aparecido en tres volúmenes separados en 1944,

1951 y 1962. Los dos primeros volúmenes tratan de minerales sin silicatos y el tercero de minerales con silicatos (cuarzo y sus polimorfos). Otros volúmenes adicionales sobre silicatos se encuentran en preparación. Una referencia más reciente es la obra en cinco volúmenes, *Rock-Forming Minerals*, escrita por W. A. Deer, R. A. Howie y J. Zussman; actualmente se están publicando volúmenes semejantes de un modo secuencial (véase referencia completa al final de este capítulo). El tratamiento de las propiedades físicas de todos los minerales en el *Sistema de Dana* es exhaustivo. Sin embargo, el libro *Rock-Forming Minerals* trata más específicamente áreas de química, estructura y estudios experimentales, pero está esencialmente restringido a los minerales que constituyen las rocas. Otra referencia, muy útil sobre química y nomenclatura de minerales es el libro *Mineralogische Tabellen* (en alemán) de H. Strunz. Un tratamiento profundo de determinados tópicos en mineralogía viene expuesto en los *Reviews in Mineralogy*, vols. 1 a 27, publicados por la Sociedad Mineralógica de América. Ejemplos de algunos títulos son: *Orthosilicates* (vol. 5), *Pyroxenes* (vol. 7), *Amphiboles and Other Hydrous Pyriboles*, *Mineralogy* (vol. 8), *Micas* (vol. 13) *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas)* (vol. 19), etc.

La bibliografía sobre literatura diversa de mineralogía se encuentra en artículos publicados en revistas científicas en todo el mundo. Las revistas mineralógicas de máxima difusión en el mundo de habla inglesa son el *American Mineralogist*, publicado por la Mineralogical Society of America el *Canadian Mineralogist*, publicado por la Mineralogical Association de Canada, y el *Mineralogical Magazine*, publicada por la Mineralogical Society de Gran Bretaña. El *Mineralogical Record*, cuya primera publicación data de 1970, trata de temas mineralógicos que frecuentemente son de mayor interés para los aficionados y coleccionistas de minerales que las dos revistas mencionadas anteriormente.

### REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

#### Obras clásicas de referencia sobre mineralogía estándar

Dana, J. D., *A System of Mineralogy*, 7ª ed., vol. 1, 1944; vol. 2, 1951; vol 3, 1962. John Wiley & Sons, New York, revisado por C. Palache, H. Berman y C. Frondel.

Deer, W. A., Howie R. A. y Zussman, J., 1962, *Rock-Forming Minerals*, 5 vols. John Wiley & Sons, New York. Tres volúmenes completamente resivados (1A, 1B y 2A) fueron publicados respectivamente en 1982, 1986 y 1988).

- Fleischer, M., 1991, *Glossary of Mineral Species*. The Mineralogical Record, Tucson, Ariz., 256 págs.
- Nickel, E. H. y Nichols, M. C., 1991, *Mineral Reference Manual*. Van Nostrand Reinhold, New York, 250 págs.
- Reviews in Mineralogy*, 1974-1992, vols. 1 a 27. Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Strunz, H., 1970, *Mineralogische Tabellen*, 5ª ed. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 621 págs.

### Libros históricos

- Agricola, G. *De Re Metallica*, traducido de la primera edición latina de 1556 por Helbert C. Hoover y Lou H. Hoover en 1950. Dover Publications, New York, 638 págs.
- Ford, W. E., 1918, The growth of mineralogy de 1818 a 1918. *American Journal of Science*, v. 46, págs. 240-254.
- Frondel, C., 1983, An overview of crystallography in North America, in *Crystallography in North America*, D. McLachlan and J. P. Glusker, eds. American Crystallographic Association, New York, págs. 1-24.
- Greene, F. C. y Burke, J. G., 1978, The science of minerals in the age of Jefferson. *American Philosophical Society*, vol. 68, pt. 4, 113 págs.
- Hazen, R. M., 1984, Mineralogy: A historical review. *Journal of Geological Education*, vol. 32, págs. 288-298.
- Knopf, A., 1941, Petrology. *Geol. Soc. Amer.*, vol. 50 aniversario, Geology 1888-1938, págs. 333-364.
- Kraus, E. H., 1941, Mineralogy. *Geol. Soc. Amer.*, 50 aniversario, Geology 1888-1938 págs. 307-332.
- Pirsson, L. V., 1918, The rise of petrology as a science. *Amer. J. Sci.*, v 46, págs. 222-240.

### Geología económica

- Brookins, D. G., 1990, *Mineral and Energy Resources: Occurrence, Exploitation and Environmental Impact*. Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio, 389 págs.
- Cameron, E. G., 1986, *At the Crossroads: The Mineral Problems of the United States*. John Wiley & Sons, New York, 320 págs.
- Craig, J. R., Vaughn, D. J., y Skinner, B. J., 1988, *Resources of the Earth*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 395 págs.
- Evans, A. M., 1987, *Introduction to Ore Geology*, 2ª ed. Blackwell Scientific Publications, London, 358 págs.
- Guilbert, J. M. y Park, C. F., Jr., 1986, *The Geology of Ore Deposits*. W. H. Freeman, New York, 984 págs.
- Lefond, S. J., ed., 1983, *Industrial Minerals and Rocks*, 5ª ed. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Baltimore, Maryland, 722 págs.
- Skinner, B. J., 1989, Resources in the 21 st century: Can supplies meet needs? *Episodes*, v. 12, págs. 267-275.
- Skinner, B. J., 1989, Mineral resources of North America, in Bally, A. W., y Palmer, A. R., eds., *The Geology of North America—And Overview*, v. A of *Geology of North America*. Geological Society of America, Boulder, Colo., págs. 575-583.
- U. S. Bureau of Mines, varios años, *Minerals Yearbook*. U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.

### Referencias adicionales

- Buseck, P. R., 1983, Electron microscopy of Minerals. *American Scientist*, v. 71, no. 2, págs. 175-185.
- Gibson, R. I., 1974, Descriptive human pathological mineralogy. *American Mineralogist*, v. 59, págs. 1177-1182.
- Lowenstam, H. A., 1981, Minerals formed by organisms. *Science*, v. 211, págs. 1126-1131.

## CAPÍTULO 2

## CRISTALOGRAFÍA

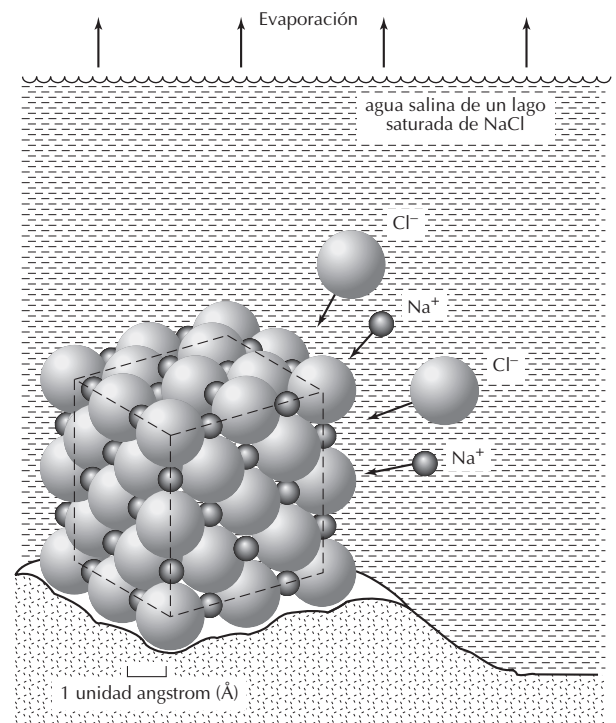
2.1 CRISTALIZACIÓN	18
2.1.1 CRECIMIENTO DE UN CRISTAL	19
2.2 ORDEN INTERNO EN LOS CRISTALES	20
2.3 ELEMENTOS DE SIMETRÍA (SIN TRASLACIÓN)	23
2.3.1 RESUMEN DE LAS OPERACIONES DE SIMETRÍA SIN TRASLACIÓN	33
2.4 MORFOLOGÍA DE LOS CRISTALES	37
2.4.1 SIMETRÍA CRISTALINA	41
2.4.2 EJES CRISTALOGRÁFICOS	42
2.4.3 FORMA	47
2.4.4 ZONAS	56
2.4.5 HÁBITO CRISTALINO	56
2.5 MEDIDA DE LOS ÁNGULOS CRISTALINOS	57
2.6 PROYECCIONES CRISTALINAS	59
2.6.1 PROYECCIÓN ESFÉRICA	59
2.6.2 PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA	60
2.7 LAS TREINTA Y DOS CLASES CRISTALINAS	69
2.7.1 SISTEMA TRICLÍNICO	71
2.7.2 SISTEMA MONOCLÍNICO	74
2.7.3 SISTEMA ORTORRÓMBICO	78
2.7.4 SISTEMA TETRAGONAL	82
2.7.5 SISTEMA HEXAGONAL	89
2.7.6 SISTEMA ISOMÉTRICO	101
2.8 INTERCRECIMIENTO DE CRISTALES	110
REFERENCIAS Y LECTURAS SUGERIDAS	116

Los minerales, con pocas excepciones, poseen la distribución interna ordenada característica de los sólidos cristalinos. Cuando las condiciones son favorables, pueden estar limitados por caras planas y pulidas y adquirir formas geométricas regulares conocidas como *crisales*. La mayor parte de los cristalógrafos emplean hoy en día el término *crystal* al referirse a cualquier sólido con estructura interna ordenada, posea éste o no caras externas, pues éstas, en general, no son más que un accidente de su desarrollo y su ausencia no modifica en absoluto las propiedades fundamentales de un cristal. Podemos, por tanto, trazar una definición más amplia de un *crystal* considerándolo como un *sólido homogéneo que posee un orden interno tridimensional de largo alcance*. El estudio de los sólidos cristalinos y las leyes que gobiernan su crecimiento, forma externa y estructura interna, se denomina *cristalografía*. Aunque la cristalografía se desarrolló originalmente como una rama de la mineralogía, es hoy en día una ciencia aparte que no sólo trata de los minerales sino también de toda la materia cristalina.

En este capítulo se presentan principalmente aquellos aspectos de cristalografía que relacionan la *forma externa* o *morfología* de los cristales. Este objetivo se denomina *cristalografía morfológica*. Sin embargo, en nuestra exposición de la forma externa de los cristales incorporaremos muchos aspectos relacionados con el *orden interno* de los cristales, ya que los principios que controlan la estructura atómica del cristal afectan también a la forma de las caras del cristal y a los ángulos que estas forman entre sí. En este Capítulo se desarrollan con mayor amplitud los aspectos relacionados con el orden interno y la estructura de los cristales.

El término general *cristalino* será empleado en este libro para denotar la posesión de una distribución ordenada de átomos en la estructura, mientras que el término *crystal*, como sustantivo se empleará en el sentido tradicional para expresar una forma geométrica regular limitada por superficies planas. El término *crystal* se empleará en su sentido más amplio con adjetivos relativos a la perfección del desarrollo. Así, un sólido cristalino con caras bien desarrolladas se denominará *euédrico*; si tiene caras imperfectamente desarrolladas, será *subédrico* y si carece de caras *anédrico*. Estos adjetivos derivan del griego *hedron*, que significa cara, de las raíces griegas *eu*, bueno, *an*, sin y de la raíz latina *sub* que significa algo.

Ciertas sustancias cristalinas se presentan en fragmentos tan finos que la naturaleza cristalina (cristalinidad) solamente puede determinarse con la ayuda del microscopio. Se las denomina *microcristalinas*. Aquellos agregados cristalinos que están tan finamente divididos que los componentes no



**FIGURA 2.1** Representación esquemática de un *núcleo* de NaCl en un lago salino en evaporación. El *núcleo*, tal como está dibujado, consta de tan sólo 125 iones empaquetados regularmente (Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>). Iones adicionales se unen, de forma ordenada, sobre la parte externa del núcleo cúbico, lo que da lugar al crecimiento del cristal. La escala utilizada para el tamaño de los iones es el angstrom ( $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ cm}$ ). Un cristal cúbico de NaCl, de 1 cm de arista, contiene aproximadamente  $10^{23}$  iones o átomos.

pueden determinarse con el microscopio, pero que dan un patrón de difracción con los rayos X, son *criptocristalinos*. Aunque muchas sustancias, tanto naturales como sintéticas, son cristalinas unas cuantas carecen de estructura interna ordenada. De éstas se dice que son *amorfas*. Las sustancias amorfas naturales se designan con el nombre de mineraloides.

## 2.1 CRISTALIZACIÓN

Los cristales se forman a partir de disoluciones, fundidos y vapores. Los átomos en estos estados desordenados tienen una disposición al azar, pero al cambiar la temperatura, presión y concentración pueden agruparse en una disposición ordenada característica del estado cristalino.