

MINERALOGÍA APLICADA



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los

derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

MINERALOGÍA APLICADA

EDITOR:

Emilio Galán Huertos

Manuel Regueiro González-Barros,
Magdalena Rodas González, José M.^a Mesa López-Colmenar,
Isabel González Díez, Francisco Velasco Roldán,
Gabriel R. Almodóvar, Manuel Bustillo Revuelta,
Juan Carlos Fernández Caliani, Santiago Leguey Jiménez,
José Luis Pérez Rodríguez, Manuel Prieto Rubio



Consulte nuestra página web: www.sintesis.com
En ella encontrará el catálogo completo y comentado

© Emilio Galán Huertos (editor)

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid
Teléfono: 91 593 20 98
<http://www.sintesis.com>

Depósito legal: M. 35.598-2003
ISBN: 84-9756-114-7

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

Relación de autores

MANUEL BUSTILLO REVUELTA
Departamento de Petrología y Geoquímica.
Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad
Complutense. 28040 Madrid
bustillo@geo.ucm.es

JUAN CARLOS FERNÁNDEZ CALIANI
Departamento de Geología. Facultad de Ciencias
Experimentales. Universidad de Huelva. 21006
Huelva
caliani@uhu.es

EMILIO GALÁN HUERTOS
Departamento de Cristalografía, Mineralogía y
Química Agrícola. Facultad de Química. Uni-
versidad de Sevilla. Apdo. 553, 41071 Sevilla
egalan@us.es

ISABEL GONZÁLEZ DÍEZ
Departamento de Cristalografía, Mineralo-
gía y Química Agrícola. Facultad de Quími-
ca. Universidad de Sevilla. Apdo. 553, 41071
Sevilla
igonza@us.es

SANTIAGO LEGUEY JIMÉNEZ
Departamento de Química Agrícola, Geología y
Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid.
Cantoblanco (Madrid)
santiago.leguey@uam.es

JOSÉ M.^a MESA LÓPEZ-COLMENAR
Departamento de Cristalografía, Mineralogía y
Química Agrícola. Facultad de Química.
Universidad de Sevilla. Apdo. 553, 41071 Sevilla
colmenar@us.es

JOSÉ LUIS PÉREZ RODRÍGUEZ
Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla.
CSIC-Universidad de Sevilla. Américo Vespucio
s/n 41092 Sevilla
jlperetz@cica.es

MANUEL PRIETO RUBIO
Departamento de Geología. Facultad de Ciencias.
Universidad de Oviedo. Arias Velasco s/n. 33005
Oviedo.
mprieto@geol.uniovi.es

MANUEL REGUEIRO GONZÁLEZ-BARROS
Instituto Geológico y Minero de España. De-
partamento de Cristalografía y Mineralogía.
UCM. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. Facultad de
Ciencias Geológicas. Ciudad Universitaria. Madrid
m.regueiro@igme.es/eurgeomr@geo.ucm.es

MAGDALENA RODAS GONZÁLEZ
Departamento de Cristalografía y Mineralogía.
Facultad de Geología. Universidad Complutense.
28040 Madrid
rodas@geo.ucm.es

GABRIEL R. ALMODÓVAR
Departamento de Geología. Facultad de Ciencias
Experimentales. Universidad de Huelva. 21006
Huelva
almodovar@uhu.es

FRANCISCO VELASCO ROLDÁN
Departamento de Mineralogía y Petrología,
Universidad del País Vasco. Campus de Leioa,
Sarriena s/n, 48940 Leioa (Vizcaya)
nppverof@lg.ehu.es

Índice

PRESENTACIÓN	15
1. MINERALOGÍA APLICADA	17
2. INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA Y ECONOMÍA DE LAS ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES	21
2.1. Introducción: El sector	21
2.2. Las rocas y minerales industriales. Definición, clasificación y usos	24
2.3. Las rocas y minerales industriales en España	27
2.3.1. Introducción	27
2.3.2. Marco geológico	28
2.3.3. Rocas y minerales industriales de España	28
2.4. La minería de rocas y minerales industriales en España	41
2.5. Tendencias del mercado	42
2.5.1. Tendencias generales	42
2.5.2. Tendencias en investigación y desarrollo	47
3. MINERALES INDUSTRIALES. FELDESPATOS, MAGNESITA Y TALCO ..	51
3.1. Introducción	51
3.2. Grupo de los feldspatos	52
3.2.1. Introducción	52
3.2.2. Usos industriales, tipología de los yacimientos y producción	54
3.2.3. Origen	55
3.3. Magnesitas	60
3.3.1. Introducción	60

3.3.2. Tipología de yacimientos y producción	60
3.3.3. Tratamiento de las magnesitas y aplicaciones	63
3.4. Talco	63
3.4.1. Propiedades y aplicaciones	63
3.4.2. Tipología de yacimientos y producción	68
4. LAS ROCAS ORNAMENTALES EN ESPAÑA: EXPLOTACIONES Y USOS ...	71
4.1. Introducción	71
4.2. Granito	72
4.2.1. Características técnicas	72
4.2.2. Explotaciones y tipos principales de granitos en España	73
4.3. Mármol	76
4.3.1. Características técnicas	76
4.3.2. Explotaciones y tipos principales de mármoles en España	77
4.4. Pizarra	78
4.4.1. Características técnicas de las pizarras	78
4.4.2. Explotaciones y principales tipos de pizarras en España	79
4.5. Explotación de canteras y elaboración	80
5. ARCILLAS CERÁMICAS DE CONSTRUCCIÓN Y CERÁMICA FINA. IMPACTO AMBIENTAL PROVOCADO POR SU EXTRACCIÓN	83
5.1. Introducción	83
5.2. Yacimientos de arcillas cerámicas	86
5.2.1. Yacimientos paleozoicos	87
5.2.2. Yacimientos de arcillas triásicas	87
5.2.3. Yacimientos de arcillas cretácicas	88
5.2.4. Yacimientos de sedimentos neógenos o cuaternarios	88
5.3. Materias primas cerámicas	89
5.4. Clasificación de los materiales cerámicos	90
5.4.1. Principales materiales cerámicos clásicos	90
5.4.2. Materiales cerámicos avanzados	94
5.5. Defectos en cerámica estructural	94
5.5.1. Defectos relacionados con las materias primas	95
5.5.2. Defectos producidos durante el proceso de fabricación	96
5.6. Investigación y futuro en cerámica estructural	96
5.6.1. Caracterización de las materias primas	97
5.6.2. Propiedades tecnológicas	97
5.6.3. Control de calidad	99
5.7. Incidencia sobre el medio ambiente y medidas de protección ecológica ...	99
5.7.1. Atmósfera	100
5.7.2. Ruido	101

5.7.3. Agua	101
5.7.4. Suelo	101
5.7.5. Sociales	102
5.7.6. Ecosistemas	102
5.7.7. Limitaciones ambientales en las emisiones producidas por la industria cerámica	102
6. ARCILLAS ESPECIALES I: CAOLINES Y ARCILLAS CAOLINÍFERAS	105
6.1. Introducción	105
6.2. Arcillas comerciales	106
6.3. Caolines y arcillas refractarias	107
6.3.1. Introducción	107
6.3.2. Producción, usos y precios	109
6.3.3. Génesis del caolín y síntesis de la caolinita	112
6.3.4. Caolines cerámicos	121
6.3.5. Caolines para carga, pigmento y estucado	124
6.3.6. Tratamiento del caolín	125
6.3.7. Principales yacimientos de caolín	127
7. ARCILLAS ESPECIALES II: BENTONITAS, Palygorskita y sepiolita .	137
7.1. Bentonitas	137
7.1.1. Introducción	137
7.1.2. Mineralogía	137
7.1.3. Propiedades y aplicaciones de las bentonitas	140
7.1.4. Génesis y yacimientos de bentonitas	146
7.1.5. Tratamientos	149
7.2. Palygorskita y sepiolita	150
7.2.1. Introducción	150
7.2.2. Estructura, composición química y propiedades	151
7.2.3. Producción, precios y principales yacimientos	161
7.2.4. Geología y génesis	162
7.2.5. Principales yacimientos del mundo	165
7.3. Consideraciones finales	175
8. GEOLOGÍA DE LOS RECURSOS MINERALES METÁLICOS	177
8.1. Introducción	177
8.2. Gangas y menas	179
8.3. Exploración minera	180
8.4. Modelos de génesis como herramienta de exploración	180

8.5. Métodos de estudio en la investigación de los recursos minerales metálicos .	182
8.5.1. Trabajos de campo	182
8.5.2. Mineralogía y texturas de las mineralizaciones	184
8.5.3. Origen de los metales y fluidos	184
8.5.4. Modelización de yacimientos	186
9. APLICACIÓN DE LA MINERALOGÍA EN EL TRATAMIENTO DE MENAS ..	189
9.1. Introducción	189
9.2. Tratamiento mineral	189
9.2.1. Importancia económica del tratamiento mineral	191
9.3. Mineralogía Aplicada y menas	191
9.3.1. Identificación mineral	191
9.3.2. Análisis textural	194
9.3.3. Ensayos de liberación y separación	195
10. APLICACIONES INFORMÁTICAS EN MINERÍA	197
10.1. Introducción	197
10.2. Clasificación de los programas informáticos mineros	198
10.3. Programas de bajo coste	198
10.3.1. Geoeas	199
10.3.2. Plane failure analysis	199
10.3.3. CSMine	200
10.4. Programas de coste intermedio	200
10.4.1. Rockworks 99	200
10.4.2. Downhole explorer	203
10.4.3. MicroModel y PolymMap	205
10.4.4. VRoom!	207
10.5. Programas de alto coste	207
10.5.1. Gemcom	209
10.5.2. MaxiPit	211
10.6. Conclusiones	213
11. MINERALOGÍA Y MEDIO AMBIENTE	215
11.1. Planteamiento de la situación	215
11.2. Medio ambiente, Geología y Mineralogía	217
11.3. Mineralogía Ambiental	218
11.3.1. Recursos naturales minerales	218
11.3.2. Almacenamiento de residuos no radiactivos	219
11.3.3. Suelos y sedimentos contaminados	220

11.3.4. Los minerales y la salud humana	222
11.3.5. Otros campos de actuación	223
11.4. Consideraciones finales	223
12. IMPACTO AMBIENTAL PROVOCADO POR LA EXTRACCIÓN DE MINERALES	225
12.1. Introducción	225
12.2. Tipos de recursos mineros	226
12.3. Métodos de explotación y tratamiento	227
12.4. Impacto ambiental producido por la extracción de minerales	229
12.4.1. Análisis del proyecto minero	229
12.4.2. Estudio del medio	231
12.4.3. Identificación de impactos en la minería a cielo abierto	231
12.4.4. Identificación de impactos en la minería subterránea	235
12.4.5. Análisis de impacto ambiental	236
12.4.6. Identificación de impactos durante el tratamiento y transporte de minerales	239
12.4.7. Evaluación de impactos	241
12.4.8. Medidas correctoras	243
12.5. Plan de abandono y recuperación	244
12.5.1. Medidas posteriores a las actividades mineras	244
12.6. Evaluación sinóptica de la relevancia ambiental	246
12.6.1. Explotaciones a cielo abierto y subterráneas	246
12.6.2. Beneficio y transporte	247
12.7. Legislación ambiental	247
13. DRENAJE ÁCIDO DE MINAS. ASPECTOS GEOQUÍMICOS Y MINERALÓGICOS	251
13.1. Introducción	251
13.2. Fuentes potenciales de aguas ácidas	252
13.3. Generación y desarrollo del drenaje ácido	255
13.3.1. La disolución oxidativa de la pirita	255
13.3.2. Poder de neutralización de los minerales acompañantes	258
13.4. Mineralogía de los productos de oxidación	259
13.4.1. Métodos de estudio	259
13.4.2. Descripción mineralógica de los precipitados	260
13.4.3. Modelo de formación	261
13.4.4. Precipitación de sulfatos solubles	262
13.5. Mineralogía aplicada a la predicción y evaluación del drenaje ácido	264

14. CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS Y REGENERACIÓN	267
14.1. Introducción y conceptos generales	267
14.2. Metales pesados	268
14.3. Origen de los elementos traza en los suelos	269
14.4. Evaluación de la contaminación por elementos traza	270
14.5. Fondos regionales y umbrales de referencia para elementos contaminantes	276
14.6. Tratamientos	277
15. ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS	287
15.1. Introducción	287
15.1.1. La radiactividad	287
15.2. El ciclo del uranio	289
15.2.1. Minería del uranio	290
15.2.2. Yacimientos de uranio	291
15.2.3. Procesado y concentrado de uranio	293
15.2.4. Enriquecimiento del uranio y fabricación del combustible	293
15.2.5. Centrales nucleares	294
15.3. Origen y clasificación de los residuos radiactivos	296
15.3.1. Escombreras de minas	297
15.3.2. Plantas de tratamiento	297
15.3.3. El combustible irradiado	298
15.3.4. Clasificación de los residuos radiactivos	300
15.4. Gestión de los residuos radiactivos	300
15.4.1. Escombreras de mina	301
15.4.2. Plantas de tratamiento	301
15.4.3. Residuos de baja y media actividad	302
15.4.4. Residuos de alta actividad	303
15.5. Almacenamiento geológico profundo (AGP)	304
15.5.1. La barrera de bentonita	305
15.5.2. El proyecto FEBEX	307
15.5.3. El proyecto Ecoclay	308
15.6. Conclusiones	312
16. MINERALOGÍA APLICADA AL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN DE BIENES CULTURALES	313
16.1. Introducción	313
16.2. Mineralogía y patrimonio histórico y artístico	314

16.3. El objeto de estudio, el muestreo y la metodología de trabajo	315
16.4. Consideración final	322
17. CARACTERIZACIÓN DE MINERALES Y NUEVAS TÉCNICAS	325
17.1. Introducción	325
17.2. Espectrometría óptica	329
17.2.1. Espectrometría ultravioleta-visible	330
17.2.2. Fotometría de llama	330
17.2.3. Absorción atómica	331
17.2.4. Espectrometría de emisión de plasma inducido	331
17.2.5. Espectrometría de emisión de arco	332
17.3. Electroodos selectivos de iones	332
17.4. Excitación por electrones, fotones e iones	333
17.4.1. Excitación por electrones y fotones	333
17.4.2. Técnicas basadas en la interacción de partículas con la materia ..	337
17.5. Análisis térmico	341
17.5.1. Análisis térmico diferencial (ATD)	341
17.5.2. Análisis termogravimétrico	342
17.6. Microscopio de fuerza atómica	342
17.7. Espectroscopia infrarroja	343
17.7.1. Fundamentos ópticos de la espectrometría dispersiva	343
17.7.2. Espectrometría con transformada de Fourier	344
17.8. Espectroscopia Raman	344
17.9. Medidas del área superficial	346
17.10. Espectroscopia de absorción de rayos X (EXAFS/XANES)	346
17.11. Espectroscopia Mössbauer	347
17.12. Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN)	348
18. MINERALES Y MATERIALES DE INTERÉS TECNOLÓGICO	351
18.1. Introducción	351
18.2. Fundamentos generales	352
18.2.1. Estímulo, cristal y respuesta	352
18.2.2. Propiedades físicas y simetría cristalina	352
18.3. Piroeléctricos, piezoelectricos y ferroelectricos	355
18.3.1. Polarización	355
18.3.2. Efecto piroeléctrico	357
18.3.3. Ferroelectricos	360
18.3.4. Efecto piezoelectrico	363
18.4. Materiales para dispositivos electroópticos	369
18.4.1. Efecto electroóptico lineal	369
18.4.2. Fenómenos de óptica no lineal	374

18.4.3. Piezoópticos	376
18.5. Absorción y emisión de luz	379
18.5.1. Ventanas ópticas	379
18.5.2. Materiales luminiscentes	381
18.5.3. Láseres de estado sólido	383
18.6. Semiconductores	385
18.6.1. Semiconducción	385
18.6.2. Minerales semiconductores	390
18.6.3. Semiconductores con propiedades específicas	391
18.7. Conductores iónicos	393
18.8. Materiales útiles por sus propiedades	396
18.9. Conclusiones	398
BIBLIOGRAFÍA	399

Presentación

Este libro contiene los textos actualizados de las lecciones del curso de “Mineralogía Aplicada”, organizado por la Universidad Internacional de Andalucía e impartido en su Sede de Sevilla durante la semana del 4 al 8 de junio de 2001. En el curso colaboraron la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (Delegación de Andalucía), el Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, el Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad de Sevilla y la Sociedad Española de Mineralogía, aportando medios, materiales y humanos, y especialistas.

La Mineralogía Aplicada no sólo trata de la búsqueda, localización, explotación y transformación de los recursos minerales, sino que hoy día juega un papel importante en la evaluación del impacto ambiental provocado por la extracción y tratamiento de recursos minerales, así mismo puede servir de base para la reducción de contaminantes del medio (aguas, suelos) y para el almacenamiento de residuos industriales urbanos y radiactivos, etc.

La Mineralogía Aplicada se puede considerar también como una interfase entre la Mineralogía Teórica y la Ciencia de Materiales y es, por tanto, de una enorme complejidad, interesando a los químicos y físicos del estado sólido, a los ingenieros de minas e industriales, geólogos y ceramistas, arquitectos y arqueólogos, entre otros profesionales. Así, la moderna Mineralogía Aplicada conecta disciplinas científicas y técnicas muy diversas, ocupando una posición cada vez más fuerte entre las ciencias aplicadas.

Para el curso se eligió una serie de temas que se agruparon en cuatro bloques: 1) Recursos Minerales, 2) Mineralogía y Medio Ambiente, 3) Caracterización de minerales y 4) Materiales avanzados. En el primero, el más extenso, se incluyó una introducción a la economía de los minerales y rocas industriales, con especial referencia a España (Manuel Regueiro), y capítulos relativos a yacimientos, explotación y usos de algunos minerales industriales (Magdalena Rodas), las rocas ornamentales (José María Mesa), las arcillas cerámicas (Isabel González) y especiales (Emilio Galán), la geología de los recursos minerales metálicos (Francisco Velasco) y el tratamiento de menas (Gabriel Ruiz de Almodóvar). Finaliza este bloque con una introducción al uso de la informática en minería (Manuel Bustillo).

El bloque dedicado a la Mineralogía y Medio Ambiente comprende una amplia introducción general (Emilio Galán) y una serie de capítulos dedicados a aspectos especiales

como el impacto ambiental producido por la extracción de minerales (Isabel González), la mineralogía y geoquímica del drenaje ácido de minas (Juan Carlos Fernández Caliani), la contaminación de suelos por metales pesados y procesos para su regeneración (Emilio Galán), el almacenamiento de residuos radiactivos (Santiago Leguey) y algunas aplicaciones de la Mineralogía al estado y conservación de bienes culturales, como objetos esencialmente degradados por la actividad ambiental (Emilio Galán).

Cierran el libro dos excelentes síntesis, una sobre las técnicas para la caracterización de minerales (José Luis Pérez Rodríguez) y otra sobre los minerales y los materiales derivados y sintéticos de interés tecnológico (Manuel Prieto).

Obviamente la orientación del curso podría haber sido otra y su resultado sería muy distinto, pero creemos que junto a temas clásicos tratados con enfoques actuales, se han introducido otros novedosos de gran futuro para la Mineralogía que abren nuevos caminos para la investigación y la innovación tecnológica. El lector especializado podrá encontrar en este libro una visión actualizada de un gran número de temas que giran alrededor de aspectos aplicados de la Mineralogía. También puede servir como texto básico para desarrollar una docencia en Mineralogía Aplicada, asignatura que, hoy optativa o de libre configuración curricular en muchos planes de estudios, tendrá (o deberá) pasar a ser materia obligatoria en currículos como los de Geología, Ciencia de Materiales, Química, Ingeniería Industrial, Ingeniería de Minas, Ingeniería Geológica, etc.

Para el buen desarrollo del curso, la Universidad Internacional de Andalucía no escatimó medios, invitando a aquellos especialistas que pudieran aportar el máximo nivel. Así, junto a profesores de la Universidad de Sevilla (José María Mesa e Isabel González), participaron otros de la Universidad de Huelva (Gabriel Ruiz de Almodóvar y Juan Carlos Fernández Caliani), Universidad Complutense de Madrid (Magdalena Rodas, Manuel Bustillo), Universidad Autónoma de Madrid (Santiago Leguey), País Vasco (Francisco Velasco), Oviedo (Manuel Prieto), del CSIC de Sevilla (José Luis Pérez Rodríguez) y del Instituto Geológico y Minero de España (Manuel Regueiro). A todos ellos, como director del curso, les agradezco enormemente su participación en el curso y su esfuerzo en plasmar posteriormente sus exposiciones en los capítulos de este libro.

La Universidad Internacional de Andalucía decidió publicar este curso de “Mineralogía Aplicada”, primer libro que con este título aparece en el mercado español, con la colaboración de la Sociedad Española de Mineralogía. Como editor científico quisiera agradecer a ambas instituciones su confianza y decidida apuesta por intentar interesar y acercar a los distintos especialistas y aficionados, que de una forma u otra trabajan con minerales, un panorama actual y avanzado de lo que es la Mineralogía Aplicada. En esta tarea, he contado con la inestimable ayuda de mi compañera Patricia Aparicio, para homogeneizar en lo posible los textos y la presentación, para que, dentro de la normal variedad de estilos y temas, se facilite la lectura.

Espero que este libro sea bien acogido por la comunidad científica y, especialmente, por los socios de la Sociedad Española de Mineralogía.

Emilio Galán Huertos
Presidente de la Sociedad Española
de Mineralogía