



MANUAL GENERAL DE MINERÍA Y METALURGIA

MINAS, CONCENTRADORES, REFINERÍAS, FUNDICIONES, LIX/ SX/ EW



PORTAL MINERO



MANUAL GENERAL DE MINERIA Y METALURGIA

MINAS, CONCENTRADORES,
REFINERIAS, FUNDICIONES,
LIX / SX / EW



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE MINERÍA
Y ENERGÍA



GOBIERNO DE CHILE
COMISIÓN CHILENA DEL COBRE



GOBIERNO DE CHILE
SERVICIO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y MINERÍA



INTRODUCCION

- Presentación 15
- Agradecimientos 17

CAPITULO 1

PROCESOS DE EXTRACCION DE MINERALES 19

1.1 EXTRACCION EN MINAS A RAJO ABIERTO 21

1.1.1 ASPECTOS GENERALES 21

1.1.2 CONSTRUCCIÓN DE UNA MINA A RAJO ABIERTO 22

- Aspectos generales 22
- Configuración de una pista de transporte 23
 - Pistas, zanjas, bermas y cunetas 23
 - Pistas para el cruce de camiones o doble vía 23
- Bermas de seguridad o contención 23
- Construcción de accesos y rampas 24
- Angulos de talud 26
- Ancho mínimo de operación 28
- Ancho máximo de expansión de un banco 28
- Desfase entre palas o largo mínimo de expansión 29

1.1.3 DISEÑO DE BOTADEROS 29

- Aspectos generales 29
- Botaderos en laderas 30
- Botaderos en quebradas 30
- Botaderos en pilas o tortas 30
- Colapso de los bordes del botadero 31
- Mantenimiento de los botaderos 31
- Presión ejercida sobre el terreno por el botadero 32
- Tipos de botaderos 32
- Operación en botaderos 32
- Cálculo del volumen a utilizar en el botadero y su costo de utilización 33
- Costo de 1 tonelada de estéril enviada a botadero 33

1.1.4 PROCESOS PRODUCTIVOS EN UNA MINA A RAJO ABIERTO 35

- Aspectos generales 35
- Esquema proveedores-proceso-clientes 35

1.1.5 OPERACIONES UNITARIAS EN LA EXPLOTACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCION 37

- Perforación 37
- Tronadura 39
- Carguío y transporte 41
- Servicios mina 42

1.1.6 LIMITES ECONOMICOS DE UNA EXPLOTACION A RAJO ABIERTO 42

- Métodos de determinación de limites económicos 42
- Ley de corte crítica 43
- Curvas de tonelaje versus ley 46
- Manejo de la información gráfica 46
- Secuencia de la explotación 47
- Definición de fases de la explotación 49
- Aspectos teóricos de planificación 50

1.1.7 INVERSIONES Y VIDA ÚTIL DE LOS EQUIPOS 51

- Programa de inversiones 51
- Vida útil de los equipos 51
- Vida económica de los equipos 51

1.2 EXTRACCION DE MINERAL EN MINAS SUBTERRANEAS 55

1.2.1 ASPECTOS GENERALES 55

1.2.2 CONSTRUCCION DE UNA MINA SUBTERRANEA 55

- Túnel 55
- Galería 56
- Desquinche 56
- Estocada 56
- Estocadas de carguío 56
- Rampa 57
- Nivel 58
- Refugio 58
- Pique 58
- Chimenea 58
- Silo o tolva 59
- Diseño de una chimenea 60
- Parrilla 61
- Reducción secundaria 63

• Buzones	63	• Bandas de frecuencia	84
• Pilares y caserones	65	1.3.3 TIPOS DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES	84
• Losa	65	• Sistema convencional	84
• Embudo	66	• Sistema troncalizado	85
• Zanja	67	1.3.4 SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN MINAS A RAJO ABIERTO	86
• Fortificación	67	1.3.5 SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN MINAS SUBTERRANEAS	86
• Hormigón proyectado	69	• Sistemas de antenas distribuidas	87
1.2.3 DISEÑO DE LA BASE DE UN CASERON	75	• Sistemas en cascada	87
• Factores a considerar en el diseño	75	• Sistemas en estrella	87
1.2.4 SISTEMAS DE TRASPASO GRAVITACIONAL	76	CAPITULO 2	
• Sistema gravitacional integral	76	PROCESOS DE CONMINUCION Y CONCENTRACION DE MINERALES	89
• Sistema gravitacional con control granulométrico	76	2.1 PROCESOS DE CONMINUCION	91
• Sistema gravitacional con carguío y transporte	76	2.1.1 ASPECTOS TECNICOS GENERALES DE LA CONMINUCION	91
1.2.5 HUNDIMIENTO POR PANELES O PANEL CAVING	76	2.1.2 CHANCADO, UNA ETAPA DE LA CONMINUCION	91
• Concepto general	76	• Índice de trabajo	93
• Características del método y su campo de aplicación	77	• Razón de reducción	94
• Malla de extracción	77	• Circuitos típicos de chancado	97
• Caracterización de una malla de extracción	77	• Selección y dimensionamiento de chancadores primarios	97
• Altura de socavación	78	• Selección y dimensionamiento de chancadores secundarios	98
• Altura óptima del bloque	78	• Selección y dimensionamiento de chancadores terciarios	99
• Conclusión	78	• Consumos de energía en circuitos de chancado	100
1.2.6 SUBLEVEL STOPPING	78	2.1.3 HARNEROS , CLASIFICACION EN SECO	100
• Aspectos generales	78	• Generalidades sobre harneros y clasificación	100
• Carguío del mineral	79	• Modelos de harneros	101
• Excavaciones en un Sub Level Stopping	79	• Capacidades de harneros	102
1.2.7 SUBLEVEL CAVING	81	• Especificaciones de mallas	102
• Descripción general del método	81	• Tipos de paneles para fijar las mallas de harneros	103
1.3 SISTEMA DE COMUNICACIONES EN LA MINERIA	83		
1.3.1 ASPECTOS GENERALES	83		
1.3.2 LAS RADIOCOMUNICACIONES	83		
• Sistema de radiocomunicaciones	83		
• Componentes básicos de un sistema de radiocomunicaciones	83		

• Guía para el tamaño de los orificios en las mallas	103
• Guía para la forma de los orificios en las mallas	105
• Equivalencias en tamaños de partículas	105

2.1.4 MANEJO DEL MINERAL A TRAVÉS DE CORREAS TRANSPORTADORAS 105

• Transporte de mineral a través de correas transportadoras	105
• Selección de una correa transportadora	106
• Sistemas de carga a las correas transportadoras	107
• Sistemas de descarga de las correas transportadoras	109
• Fundamentos del diseño de las correas transportadoras	110
• Información requerida para el correcto diseño y selección de una correa transportadora	110
• Definiciones para el diseño	111
• Consideraciones básicas del diseño	111
• Definición y clasificación de los elementos de un diseño de correa	112
• Cálculos generales de diseño de una correa	113
• Sistemas de limpieza en correas transportadoras	120
• Alineación del sistema transportador	121
• Empalmes en correas transportadoras	122
• Problemas mas comunes en la operación de correas transportadoras	123

2.1.5 MOLIENDA, OTRA ETAPA DE LA CONMINUCION 125

• Aspectos generales	125
• Molienda convencional	125
• Molinos de barras	126
• Molinos de bolas	127
• Molinos semiautógenos o SAG	128
• Índice de Bond	129
- Aplicaciones del índice de Bond	131
- Demanda de potencia de los molinos rotatorios	131
- Simulación y evaluación de la operación de molienda	131
- Uso eficiente de la energía en conminución	132
• Dimensionamiento de molinos	132
• Circuitos de molienda	133
- Circuito típico barras-bolas	133
- Circuito de un molino unitario	135
- Circuito de un molino SAG	135
- Circuito de un molino SAG y un chancador	135
- Circuito de un molino SAG, un molino de bolas y un chancador	136
• Revestimientos y componentes de los molinos	136

2.1.6 HIDROCICLONES, CLASIFICACION EN HUMEDO 136

• Aspectos generales	136
• Descripción de la clasificación con hidrociclones	136
• Dimensionamiento de hidrociclones	137
• Selección de la cantidad de hidrociclones	138

2.2 PROCESO DE FLOTACION 139

2.2.1 DESCRIPCION DEL PROCESO 139

2.2.2 REACTIVOS DE FLOTACION 141

• Calidad de los minerales a ser concentrados	141
• Tamaño y formas de las partículas	142
• Efecto de la densidad de pulpa	142
• Temperatura de la pulpa	142
• Composición del agua de proceso	142
• Alimentación de reactivos	143
• Velocidad de alimentación a las celdas de flotación	143
• Efecto del pH en la flotación	143
• Determinación del volumen total de celdas de flotación	143
• Selección de la cantidad de celdas por banco	144
• Selección de la disposición de los bancos	144

2.2.3 CLASIFICACION DE LOS REACTIVOS DE FLOTACION 145

• Colectores	145
- Xantatos	145
Preparación y manejo de soluciones de xantatos	147
Sugerencias de mezclado	147
- Ditiósfatos	147
- Tionocarbamatos	147
• Espumantes	148
- Tipos de espumantes	148
- Reactivos que afectan las características de los espumantes	148
• Modificadores	148
• Depresores	150
• Activadores	150

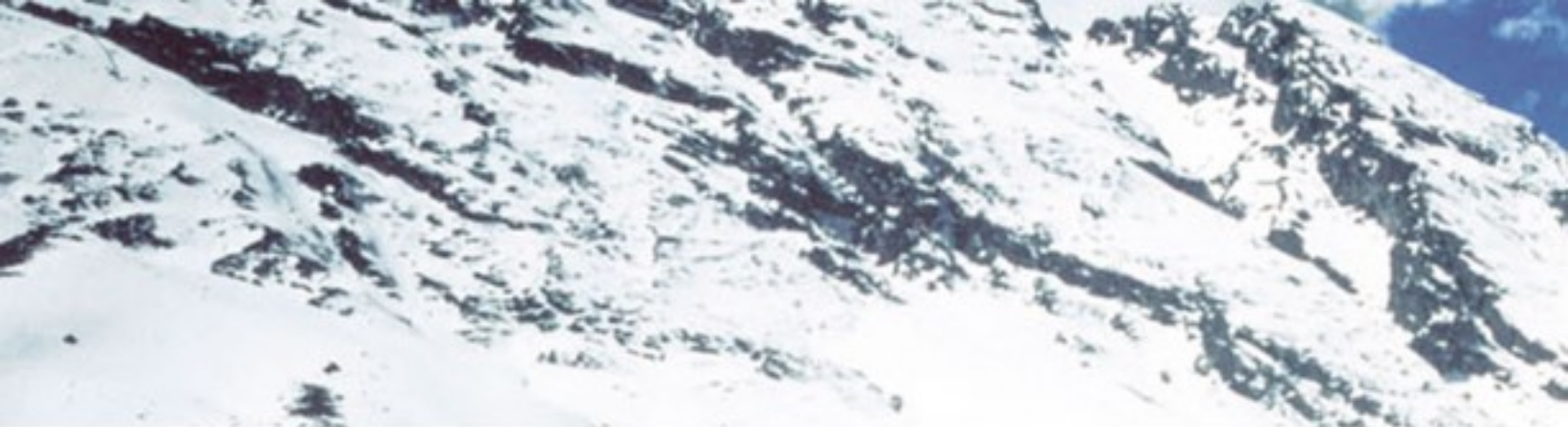
2.2.4 FLOTACION DE DIFERENTES TIPOS DE MINERALES 150

• Minerales de cobre	150
• Minerales de cobre-cobalto	150
• Minerales de cobre-molibdeno	150

• Minerales de cobre-plomo-zinc	151	- Bombas de pulpa con revestimiento de goma para trabajo pesado	166
• Minerales de cobre-zinc	151	- Bombas de pulpa con revestimiento de goma para trabajo en minería	167
• Minerales de plomo-zinc	151	- Bombas verticales de pozo	167
• Minerales de oro-pirita	152	- Bombas de estanque vertical	168
		- Bombas verticales de espuma	168
2.2.5 PROCESO DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO	152	2.2.7 FILTRACION	169
• Comportamiento de la sedimentación	152	• Aspectos generales	169
• Preparación de floculantes en laboratorio	152	• Métodos y equipos de filtración	169
• Comentarios a la realización de pruebas de floculación	153	- Filtración gravimétrica	169
• Tablas de resultados y gráficos	154	- Filtro de espiral	169
		- Tornillo de arena	169
2.2.6 MANEJO DE PULPAS	156	- Rueda de filtración	169
• Pulpas y control metalurgico-operacional	156	- Filtros de vacío	171
• Balanza marcy	156	- Filtros de tambor	171
• Determinaciones en el manejo de pulpas	156	- Filtro de presión de Placa Vertical	171
- Determinación de la gravedad específica de los sólidos secos	156	- Operación de un Filtro de presión	172
- Obtención de una muestra	157		
- Determinación de la gravedad específica de la pulpa	157	2.2.8 SECADO	173
- Determinación del porcentaje de sólidos	157	• Equipos de secado	173
- Intercambio de las carátulas de la balanza	157	- Secador giratorio de calor directo	173
- Determinación de la malla de la pulpa	158	- Secador giratorio de calor indirecto	174
- Medición del tonelaje en las corrientes de la pulpa	158	- Secador de tubo de vapor	174
• Dosificación de reactivos de flotación	159	- Horno vertical	174
• Fórmulas de concentración y recuperación	159	- Lecho fluidizado	174
- Fórmula de recuperación para dos productos	159	- Secador de tornillo de calor indirecto	174
- Fórmula de recuperación para tres productos	160		
- Razón de concentración	160	CAPITULO 3	
• Datos sobre densidad de pulpas	161	PROCESOS HIDROMETALURGICOS	175
• Costos de bombeo	161	3.1 PROCESOS DE LIXIVIACION	177
- HP requeridos para elevar agua	161	• Aspectos generales	177
- Costo por consumo de energía en motores eléctricos	162	3.1.1 MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN	179
- Fórmulas básicas para mecánica de fluidos	162	• Lixiviación in situ	179
• Bombas de pulpas	162	• Lixiviación en botaderos	180
- Limitaciones para los sólidos en el transporte hidráulico	163	• Lixiviación en pilas	180
- Bombas de pulpa como concepto de operación	163	• Lixiviación en bateas	183
- Definiciones básicas	163	• Lixiviación por agitación	183
- Fluctuaciones de tamaño de sólidos transportados	164		
- Bombas de pulpa y su nombre por la aplicación donde operan	164		
• Selección de bombas	165		
- Bombas de pulpa metálicas para trabajo pesado	165		
- Bombas de pulpa con revestimiento de goma para trabajo muy pesado	165		



3.1.2 LIXIVIACIÓN DE ORO	183		
• Descripción del proceso	183		
• Reacciones del proceso de cianuración	184		
• Determinación de parámetros en laboratorio	184		
• Análisis de resultados	185		
- Lixiviación CCD	185		
- Lixiviación CIP	185		
- Adsorción CIP	187		
3.1.3 LIXIVIACIÓN QUÍMICA DE MINERALES OXIDADOS	187		
• Lixiviación de minerales oxidados en ausencia de modificadores de potencial redox	188		
• Lixiviación de minerales oxidados en presencia de agentes oxidantes	188		
• Lixiviación de minerales oxidados en presencia de agentes reductores	188		
• Procesos para lixiviar minerales oxidados	188		
• Procedimiento básico de la lixiviación de cobre oxidado	189		
3.1.4 LIXIVIACIÓN QUÍMICA DE MINERALES SULFURADOS	189		
• Aspectos teóricos generales	189		
• Procesos más comunes para lixiviación de minerales y concentrados sulfurados	190		
3.1.5 LIXIVIACIÓN BACTERIANA DE MINERALES SULFURADOS	190		
• Principios teóricos	190		
• Avance tecnológico	191		
• Lixiviación bacteriana de minerales, concentrados y relaves	193		
• Oxidación de hierro (Fe)	194		
• Mecanismos de lixiviación bacteriana	195		
• Desarrollo bacteriano	195		
• Otros microorganismos de importancia	195		
• Aplicación de los procesos biológicos	196		
3.2 PROCESOS DE PURIFICACION	198		
3.2.1 PROCESO DE ADSORCION POR CARBON ACTIVADO	198		
• El carbón activado	198		
		• Carbones activados para aplicaciones especiales	199
		• Etapas del proceso de carbón activado aplicado al oro y la plata	199
		3.2.2 PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO CON RESINAS – IX	203
		• Aspectos Generales	203
		• Aplicaciones del proceso de IX en hidrometalurgia	203
		3.2.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES – SX	205
		• Extracción por solventes – SX	205
		• Objetivos del proceso SX	205
		• Etapas y mecanismos de la extracción por solventes	206
		- Procedimiento básico	206
		- Etapa de extracción o carga del reactivo	207
		- Etapa de reextracción o descarga del reactivo	207
		- Ejemplos típicos de SX	207
		• Reactivos extractantes usados en SX para la recuperación de cobre	208
		- Propiedades de los agentes extractantes	208
		- Selección de los agentes extractantes	209
		- Clasificación de los reactivos extractantes	210
		- Extractantes tipo quelantes	210
		- Extractantes del tipo ácido orgánico	211
		- Extractantes del tipo sustitución ligante	211
		- Reactivos del tipo extracción neutra o solvatante	211
		- Reactivos orgánicos extractantes con formación de par iónico	212
		- Reactivos extractantes usados comercialmente	212
		- Pérdidas de extractante	213
		• Reactivos diluyentes usados en SX	213
		- Características de un diluyente	213
		- Elección del diluyente	214
		• Reactivos modificadores	214
		• Solución acuosa	215
		• Equipamiento básico de extracción por solventes	215
		• Parámetros de la operación	216
		3.2.5 PROCESO DE ELECTROOBTENCION - EW	216
		• Descripción general proceso de electroobtención	216
		• Celdas electrolíticas	217
		- Configuración de circuitos	217
		- Conexiones eléctricas	217
		- Tipos de celdas electrolíticas	218



• Diferencias y similitudes entre celdas de EW y ER	219
- Materiales de las celdas electrolíticas	219
- Eficiencia y densidad de corriente	219
• Diseño y materiales de ánodos	220
- Anodos de EW	220
- Anodos de ER	220
• Diseño y materiales de los cátodos en el manejo del producto	221
- Placas madre	221
- Cátodos permanentes	221
- Tecnologías relacionadas	221
• Diafragmas para electrodos	222

CAPITULO 4

PROCESOS PIROMETALURGICOS 223

4.1 LA SECUENCIA CLASICA EN LA PIROEXTRACCION DE COBRE 225

4.1.1 ASPECTOS GENERALES 225

4.1.2 ETAPAS DEL PROCESO 226

• Recepción y manejo de materias primas e insumos	226
• Secado de concentrados	226
• Tostación parcial de concentrados	227
• Alimentación de concentrados al horno de fusión	229
• Fusión de concentrados	229
• Limpieza de escorias	233
• Granallado de eje de alta ley y escorias	234
• Preparación y manejo de eje de alta ley	234
• Conversión de eje de alta ley	234
• Refinación y moldeo de ánodos	240
• Plantas de limpieza de gases	241

4.1.3 PIROREFINACION DEL COBRE BLISTER 242

• Descripción	242
• Oxidación	242
• Reducción	243

4.1.4 PLANTAS DE OXIGENO 244

4.2 DESARROLLO DE PROCESOS CONTINUOS DE PRODUCCION DE COBRE 244

4.2.1 ASPECTOS GENERALES 244

4.2.2 EL DESARROLLO DE LA PRODUCCION CONTINUA DE COBRE 245

4.2.3 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS 254

CAPITULO 5

MERCADO DE EQUIPOS PRINCIPALES USADOS EN MINERIA Y PROCESAMIENTO DE MINERALES 257

5.1 EQUIPOS MAYORES USADOS EN LA EXTRACCION DE MINERALES 259

5.1.1 EQUIPOS MINA RAJO ABIERTO 259

• Atlas Copco	259
• Finning Chile	260
• MinePro Chile	264
• Bucyrus	264
• Komatsu	265
• Sandvik	266

5.1.2 EQUIPOS MINA SUBTERRANEA 268

• Atlas Copco	268
• Sandvik	269

5.2 EQUIPOS PRINCIPALES USADOS EN CONMINUCION Y CONCENTRACION 272

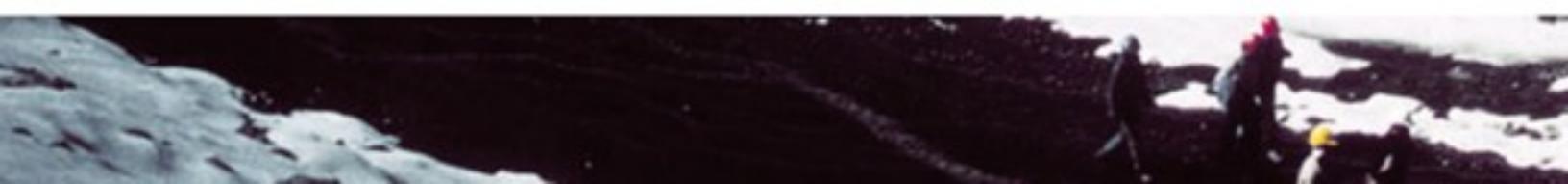
5.2.1 EQUIPOS DE CONMINUCION Y CONCENTRACION 272

• Metso	272
• Sandvik	284
• FFE Minerals	285
• Outokumpu	287
• Dorr-Oliver Eimco	289
• Larox	291
• Weir Vulco	293
• Krebs	293

5.3 EQUIPOS USADOS EN HIDROMETALURGIA 294

5.3.1 EQUIPOS PRINCIPALES 294

• Outokumpu	294
• Krebs	296





5.4 EQUIPOS USADOS EN PIROMETALURGIA	297
5.4.1 EQUIPOS	297
• Outokumpu	297
5.5 OTROS EQUIPOS	298
5.5.1 EQUIPOS	298
• Outokumpu	298
TABLAS DE CONSULTA	299
TABLAS DE USO ESPECIFICO	301
• Sistema periódico de los elementos	301
• Tablas de pulpa para minerales de diferente gravedad específica	302
• Escala de tamices	352
• Distribución granulométrica	354
• Manual del explosivista de Enaex	355
• Fórmulas para tronadura y tablas de carguío de Orica	363
TABLAS DE USO GENERAL	364
• Unidades básicas del Sistema Internacional	364
• Unidades no métricas de uso permitido en el S.I.	364
• Unidades utilizadas con el S.I. cuyos valores se determinaron experimentalmente	365
• Unidades ajenas al S.I. que deben mantenerse	365
• Unidades derivadas del S.I. con nombre especial	366
• Múltiplos y submúltiplos	367
• Constantes de interés	368
• Factores de conversión más comunes	370
• Factores de conversión por unidad	372
• Equivalencia métrica del sistema inglés en tuberías	376
• Equivalencias métricas y decimales de las fracciones	377
GLOSARIO	379
BIBLIOGRAFIA	399

