

CALCULO DE INDICES DE ECOEFICIENCIA DE LA  
MINERIA EN MEXICO



TECNOLOGICO  
DE MONTERREY

T E S I S

MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN SISTEMAS AMBIENTALES

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

POR

JOSE LUIS MARTINEZ ORTIZ

MARZO DE 2004

**CALCULO DE INDICES DE ECOEFICIENCIA DE LA  
MINERIA EN MEXICO**



**TECNOLOGICO  
DE MONTERREY**

**T E S I S**

**MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY**

**POR**

**JOSE LUIS MARTINEZ ORTIZ**

**MARZO DE 2004**

**CÁLCULO DE ÍNDICES DE ECOEFICIENCIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**T E S I S**

**MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS**

**SUPERIORES DE MONTERREY**

**POR**

**JOSÉ LUIS MARTÍNEZ ORTIZ**

**MARZO DE 2004**

## DEDICATORIA

*A Dios, por Su inmenso amor en la montaña y en el combate*

*A Jesús, Quien me amó y se entregó por mí*

*A mi familia, quienes hacen tangible lo infinito*

*A la Madre Teresa, porque mostró que sí se puede*

*A los que tienen esperanza, para que no se rindan*

*“María, en el misterio de su anunciación y visitación, es el modelo de cómo deberíamos vivir, porque primero recibió a Jesús en su vida, y luego sintió la necesidad de compartir lo que había recibido”*

Madre Teresa de Calcuta

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme Su amor en cada detalle durante estos años y mostrarme que la felicidad plena es un camino que conduce hacia Su rostro.

A mi papá José Luis, por tener siempre una respuesta de amor a mis preguntas.

A mi mamá María Guadalupe, por su amor y entrega ilimitada a toda hora.

A mi hermana Alejandra, por sus detalles y opiniones profundas.

Al Dr. Francisco J. Lozano, por su apoyo, guía y comprensión durante la maestría y en las horas difíciles.

Al Dr. Joaquín Acevedo y al Dr. Vicente J. Garza, por sus atenciones y comentarios brindados para la culminación de este escrito.

A Peñoles, por las facilidades otorgadas en la investigación bibliográfica.

A las Brigadas Misioneras, por prestar su espacio y tiempo para vivir la experiencia.

A Santa Lucía, por asilo, aterrizaje y lecciones de vida concedidas.

## RESUMEN

CÁLCULO DE ÍNDICES DE ECOEFICIENCIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO

MARZO DE 2004

JOSÉ LUIS MARTÍNEZ ORTIZ

INGENIERO QUÍMICO Y DE SISTEMAS

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
DIRIGIDA POR EL DR. FRANCISCO JOSÉ LOZANO GARCÍA

La riqueza minera en México ha sido valorada desde los tiempos de la Conquista y en estos siglos que han transcurrido se ha convertido en una importante fuente de ingresos para el país, con la formación de corporaciones minerales que ocupan sitios importantes como productores a nivel mundial, y que en consecuencia hacen de México uno de los países con mayor riqueza de minerales en el planeta. Sin embargo, existe rezago en ciertas áreas de tecnología, aunado al agotamiento gradual de los yacimientos de mayor concentración de minerales, que provocan la pérdida de competitividad de las empresas nacionales con respecto a otros países.

La utilización de índices de ecoeficiencia representa una manera práctica y universal de medir el desempeño ambiental, económico y social de los procesos productivos, de tal forma que se persiga de manera global el logro del desarrollo sostenible en México. Existen organismos no gubernamentales internacionales que promueven el uso de estos indicadores como una herramienta de comparación y benchmarking entre instituciones, lo cual permite el conocer cuáles son las áreas de oportunidad de mejora en un proceso y de qué manera es posible establecer prioridades para lograr incrementar el desempeño de los procesos.

Algunos indicadores de ecoeficiencia que se proponen como una base para realizar cálculos se fundamentan en información relacionada con el uso de materiales necesarios para la realización de un producto terminado, así como la emisión de gases denominados de efecto

invernadero y de dispersión de tóxicos, que son propios de algunos procesos de la industria minera. Estos mismos indicadores pueden ser en términos absolutos de masa de producto y materias primas, o también pueden ser en términos relativos si se incorpora el flujo de efectivo originado el valor económico del producto terminado en los mercados internacionales.

El uso de indicadores de ecoeficiencia requiere de información de materias primas, proceso y producto terminado, que permita su cálculo. Sin embargo, todavía no existe una cultura generalizada entre las empresas a nivel mundial para publicar información de la compañía, misma que afecta directa o indirectamente al resto de los componentes de la sociedad debido al impacto económico, ecológico y/o social que existe. Las instituciones de gobierno no han sido capaces de lograr legislación suficiente que permita el acceso a la información de carácter público para los grupos de interés. Algunas naciones industrializadas, e inclusive naciones de América del Sur, han ido trabajando en el desarrollo de esta información pública y ya es posible realizar algunos cálculos generales. Sin embargo, en México todavía existe una gran área de oportunidad en el libre flujo de información.

En este trabajo se desarrollan algunos minerales importantes en la industria nacional, de tal manera que permita conocer de manera general cuáles son las características actuales del mineral, en términos de orígenes, propiedades, precios, usos principales e investigación más reciente, de tal forma que permita ubicar al lector en el contexto adecuado de cada mineral, para así entender de una mejor forma cuáles son las generalidades del proceso para la explotación del mineral, el posible impacto ambiental existente, y finalmente llegar a calcular los índices de ecoeficiencia. Una vez finalizado el desarrollo de los minerales, es posible realizar una comparación entre los mismos y obtener conclusiones sobre cuál es el estado actual de la minería en México en materia de ecoeficiencia.

## ÍNDICE

Resumen	vi
Índice de contenido	viii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xiii
Capítulo 1.- Introducción	1
1.1 - La industria de la minería	1
1.2 – Problemática actual y justificación del trabajo	2
1.3.- Minería en el mundo	4
1.4.- Minería en México	6
Capítulo 2.- Marco Teórico	12
2.1.- La Minería y el Desarrollo Sostenible	12
2.2.- Ecoeficiencia	18
2.3 - Medición de Ecoeficiencia	24
2.4 - Perfil de Ecoeficiencia	28
2.5 - Conceptos de mineralogía	30
Capítulo 3.- Metodología	34
3.1 - Selección de minerales	34
3.2 - Selección de indicadores	35
3.3 - Procesos	37
Capítulo 4.- Desarrollo de minerales y resultados	38
4.1.- Barita	38
4.2.- Bismuto	43
4.3.- Cadmio	49
4.4.- Celestita	54
4.5.- Cemento	60

4.6.- Cobre	66
4.7.- Fluorita	74
4.8.- Grafito	80
4.9.- Molibdeno	85
4.10.- Oro	90
4.11.- Plata	96
4.12.- Plomo	103
4.13.- Sal	108
4.14.- Zinc	115
4.15.- Procesos Unificados	122
Capítulo 5.- Discusión de Resultados	127
Capítulo 6.- Conclusiones	133
Bibliografía	139
Apéndice	
Vita	

## Índice de Tablas

Tabla 1.3.1	Destinos de inversión en exploración de yacimientos en el 2001	4
Tabla 1.3.2	Principales 50 compañías mineras a nivel mundial	5
Tabla 1.4.1	Participación de México en la producción mundial de minas	9
Tabla 1.4.2	Participación de los principales estados mineros de México	10
Tabla 2.1.1	Impacto ambiental ocasionado por actividades de la minería	13
Tabla 2.1.2	Convenciones Ambientales Internacionales con efectos en la industria minera	15
Tabla 2.2.1	Planes de acción del WBCSD para apoyar el desarrollo de la ecoeficiencia	22
Tabla 2.3.1	Tipos de indicadores de ecoeficiencia	27
Tabla 2.4.1	Ejemplo de Perfil de ecoeficiencia de una organización	29
Tabla 3.1.1	Definición de indicadores utilizados	36
Tabla 4.1.1	Propiedades de la barita	38
Tabla 4.1.2	Precio promedio de la barita	39
Tabla 4.1.3	Producción de barita en México	39
Tabla 4.1.4	Indicadores de ecoeficiencia de la barita	41
Tabla 4.2.1	Propiedades del bismuto	43
Tabla 4.2.2	Precio promedio del bismuto	44
Tabla 4.2.3	Producción de bismuto de minas en México	44
Tabla 4.2.4	Producción de refinерías de bismuto en México	45
Tabla 4.2.5	Cantidad de Mg y Ca a utilizar en la desbismutización	46
Tabla 4.2.6	Indicadores de ecoeficiencia del bismuto	47
Tabla 4.3.1	Propiedades del cadmio	49
Tabla 4.3.2	Precio promedio del cadmio al 99.95% en Nueva York	50
Tabla 4.3.3	Producción de refinерías de cadmio en México	51
Tabla 4.3.4	Indicadores de ecoeficiencia del cadmio	52
Tabla 4.4.1	Propiedades físicas del estroncio y/o celestita	55
Tabla 4.4.2	Precio promedio de la celestita	56
Tabla 4.4.3	Producción de celestita en México	56

Tabla 4.4.4	Indicadores de ecoeficiencia de la celestita	58
Tabla 4.5.1	Precio promedio internacional del cemento	62
Tabla 4.5.2	Producción de cemento en México	62
Tabla 4.5.3	Indicadores de ecoeficiencia del cemento	64
Tabla 4.6.1	Propiedades del cobre	67
Tabla 4.6.2	Precio del cobre alto grado en el London Metal Exchange	68
Tabla 4.6.3	Producción de minas de cobre en México	68
Tabla 4.6.4	Producción de hornos de fundición en México	68
Tabla 4.6.5	Producción de cobre refinado en México	68
Tabla 4.6.6	Indicadores de ecoeficiencia del cobre	72
Tabla 4.7.1	Propiedades de la fluorita	74
Tabla 4.7.2	Precio promedio de fluorita grado ácido y metalúrgico	75
Tabla 4.7.3	Producción de fluorita en México	76
Tabla 4.7.4	Indicadores de ecoeficiencia de la fluorita	77
Tabla 4.8.1	Precio promedio del grafito amorfo mexicano	81
Tabla 4.8.2	Producción de grafito amorfo y cristalino en México	82
Tabla 4.8.3	Indicadores de ecoeficiencia del grafito	83
Tabla 4.9.1	Propiedades del molibdeno	85
Tabla 4.9.2	Precio promedio del molibdeno	86
Tabla 4.9.3	Producción de molibdeno en México	86
Tabla 4.9.4	Indicadores de ecoeficiencia del molibdeno	88
Tabla 4.10.1	Propiedades del oro	91
Tabla 4.10.2	Precio promedio del oro	92
Tabla 4.10.3	Producción de oro en México	92
Tabla 4.10.4	Refinación de oro en México	92
Tabla 4.10.5	Concentraciones reportadas de oro en minas mexicanas	93
Tabla 4.10.6	Indicadores de ecoeficiencia del oro	94
Tabla 4.11.1	Propiedades de la plata	97
Tabla 4.11.2	Precio promedio de la plata	98
Tabla 4.11.3	Producción de plata en México	98
Tabla 4.11.4	Concentraciones reportadas de plata en minas mexicanas	99

Tabla 4.11.5	Indicadores de ecoeficiencia de la plata	101
Tabla 4.12.1	Propiedades del plomo	103
Tabla 4.12.2	Precio promedio del plomo en el London Metal Exchange	104
Tabla 4.12.3	Producción de concentrado de plomo en México	105
Tabla 4.12.4	Producción de refinería de plomo en México	105
Tabla 4.12.5	Indicadores de ecoeficiencia del plomo	106
Tabla 4.13.1	Propiedades de la sal	109
Tabla 4.13.2	Precio promedio de la sal de evaporación	110
Tabla 4.13.3	Producción de sal en México	110
Tabla 4.13.4	Indicadores de ecoeficiencia de la sal	113
Tabla 4.14.1	Propiedades del zinc	115
Tabla 4.14.2	Precio promedio del zinc en el London Metal Exchange	117
Tabla 4.14.3	Producción de concentrado de zinc en México	118
Tabla 4.14.4	Producción de hornos de fundición de zinc en México	118
Tabla 4.14.5	Indicadores de ecoeficiencia del zinc	119
Tabla 4.15.1	Indicadores de ecoeficiencia para los procesos unificados	123
Tabla 5.1.1	Indicadores de ecoeficiencia de uso de materiales	127
Tabla 5.1.2	Indicadores de ecoeficiencia de cambio climático	129
Tabla 5.1.3	Indicadores de ecoeficiencia de dispersión de tóxicos	130

## Índice de Figuras

Figura 1.4.1	Destinos de inversión en México	7
Figura 1.4.2	Mapa minero de México	8
Figura 1.4.3	Participación por sectores en el valor de la producción	10
Figura 1.4.4	Valor de producción nacional por mineral	11
Figura 4.1.1	Diagrama de proceso para barita	42
Figura 4.2.1	Diagrama de proceso para bismuto	48
Figura 4.3.1	Diagrama de proceso para cadmio	53
Figura 4.4.1	Diagrama de proceso para celestita	59
Figura 4.5.1	Diagrama de proceso para cemento	65
Figura 4.6.1	Diagrama de proceso para cobre	73
Figura 4.7.1	Diagrama de proceso para fluorita	79
Figura 4.8.1	Diagrama de proceso para grafito	84
Figura 4.9.1	Diagrama de proceso para molibdeno	89
Figura 4.10.1	Diagrama de proceso para oro	95
Figura 4.11.1	Diagrama de proceso para plata	102
Figura 4.12.1	Diagrama de proceso para plomo	107
Figura 4.13.1	Principales yacimientos de sal en México	109
Figura 4.13.2	Diagrama de proceso para sal	114
Figura 4.14.1	Diagrama de proceso para zinc	121
Figura 4.15.1	Diagrama de proceso para Pb-bi-Ag-Au	124
Figura 4.15.2	Diagrama de proceso para Cu-Mo	125
Figura 4.15.3	Diagrama de proceso para Zn-Cd	126

# Capítulo 1

## Introducción

### *1.1 La Industria de la Minería*

Una definición de minería puede ser sencillamente “la extracción de minerales de la tierra.” (UNEP, 2000). Se puede extender esta definición como “el proceso que comienza con la exploración y descubrimiento de yacimientos minerales y continua con la extracción de la mena y el beneficio y remediación del lugar de trabajo.” (UNEP, 2000)

La minería es una de las actividades más antiguas de la especie humana. Desde los primeros hombres, el uso de artículos provenientes de las cuevas y lugares recónditos, fue de gran ayuda para su supervivencia. Aquellos hombres fueron descubriendo gradualmente que existían materiales que ya fuera por sus características de dureza o maleabilidad, o simplemente por su hermosa apariencia y brillo, le eran de beneficio enorme.

La capacidad del ser humano para fabricar y utilizar herramientas es quizá la razón más importante del progreso que ha derivado en la actual era tecnológica. Aunque los primeros hombres utilizaron piedras y madera como instrumentos, no fue hasta que descubrieron metales útiles como el bronce y el acero, lo que les dio una ventaja militar sobre tribus y pueblos rivales. Se cuenta que hace 3,500 años, los hititas fueron los primeros que lograron fundir el hierro y construir armas, pero fue hasta mucho después que se descubrió el templado y con ello la fabricación de armas duras y filosas.

Desde entonces, la posesión de ciertos metales y minerales han sido motivo de ambiciones de muchos hombres y causa de conflictos y terribles guerras a lo largo de la Historia. Hoy en día, quizás se puedan enumerar otras tantas industrias que también son elementos clave para la seguridad y supervivencia de las naciones, pero indudablemente que, en el complicado entorno global del Siglo XXI, contar con recursos minerales suficientes puede convertir a un país en aliado de otras naciones poderosas, y así asegurar el bienestar último de sus ciudadanos. Es pues que, dada la importancia que ha tenido la industria minera a lo largo de los tiempos, es digna de estudio y análisis que tengan por objetivo garantizar la mayor disponibilidad de estos recursos no renovables. Resulta paradójico, y bastante aleccionador, que en un siglo donde la tecnología puede desarrollarse a niveles inimaginables, finalmente el hombre moderno disputará la posesión de recursos que han

información concerniente al desempeño ambiental de la misma, teniendo por objetivo el querer convencer a la sociedad las acciones de mejora y lo “limpio” que son los procesos productivos en dicha compañía. En este trabajo se verá posteriormente algunos ejemplos del tipo de información pública disponible y la manera de reportarlos.

Sin embargo, en México esto es la excepción y todavía no es común el realizar reportes públicos ambientales, y la información disponible en medios impresos o electrónicos se limita a declarar compromisos ambientales de las empresas, pero sin llegar a especificar datos puntuales. En general, en las empresas mundiales, y particularmente las mexicanas, falta una cultura de creación y seguimiento de indicadores para desempeño ambiental.

Se reconoce pues que en México existe esta problemática de falta de información ambiental de los procesos, y dada la creciente preocupación mundial por el tema de contaminación y desarrollo sostenible, es importante ir incorporando esta información para poder seguir compitiendo a nivel internacional. Hoy más que nunca, existe la amenaza latente de utilizar pretextos de índole ambiental como meras barreras proteccionistas por parte de los países más desarrollados, y si México no realiza esfuerzos en este sentido por cumplir con los estándares internacionales de calidad ambiental, el crecimiento del país puede verse afectado y ahondar el estancamiento económico. Ante la globalización y el crecimiento del comercio internacional, México debe desarrollar infraestructura y concretar hechos que permitan al país permanecer competitivo no sólo a nivel regional, sino mundial..

Es aquí donde, en la búsqueda de mejores formas de medir los procesos, que se ha propuesto la utilización de indicadores tales como la ecoeficiencia, ya sea de materiales o de energía, así como el índice de ecotoxicidad por mencionar algunos. Estos valores aplicado en procesos productivos nos permiten conocer cuál es el grado de aprovechamiento de los recursos empleados para lograr un producto final, así como la dispersión tóxica de materiales que pudiera estarse generando durante el mismo proceso.

A lo largo de este trabajo, se mostrarán los cálculos de índice de ecoeficiencia de materiales, así como la dispersión de tóxicos generada en el proceso de extracción y refinación y el índice de cambio climático donde aplique, para los principales minerales que México produce. Estos indicadores permitirán tener una visión general de la ecoeficiencia de los procesos mineros del país y de esta manera apoyar la difusión de esta información

existido por siempre: agua, petróleo, tierra fértil, metales, etc. Quizá y después de todo, aquellos que defendían la teoría de que la Historia está compuesta de ciclos y eventos circulares no estén tan errados del todo.

En México, y como se observará a lo largo de este trabajo, existe una abundante cantidad de recursos minerales que han contribuido a su desarrollo económico y social. Cuando los conquistadores españoles conocieron las diferentes culturas en el territorio que ahora se conoce como México, quedaron maravillados de la belleza de los lugares y construcciones de las tribus indígenas, en las cuales se utilizaban minerales como ofrenda a las deidades. Finalmente, el acero de las espadas españolas doblegó los monumentos dorados indígenas, y la conquista, con su consecuente explotación de recursos, forjó un nuevo camino en la incipiente nación mexicana.

Sin embargo, ahora ya no es suficiente solamente tener una capacidad productora importante de minerales para considerar una aventura económica como prometedora. El impulso que se ha dado principalmente desde la segunda mitad del siglo XX al cuidado ecológico y la preservación del ambiente está obligando cada vez más a las industrias a ponderar el factor contaminante dentro de sus análisis de factibilidad de proyectos. Organismos No Gubernamentales tales como el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible han incorporado nuevas medidas y guías enfocadas al cuidado ambiental y a lograr el desarrollo sustentable de los procesos y sistemas actuales.

### *1.2 Problemática actual y justificación del trabajo*

Históricamente la industria minera ha estado clasificada como de las “villanas” en cuanto a su contribución al deterioro ambiental debido a los procesos utilizados que dejan una alta cantidad de residuos “in situ”, manejo de materiales altamente tóxicos, quema de combustibles y emisión de gases de efecto invernadero. Por mencionar un ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos reporta que en 1992, solamente la industria de extracción del oro produjo 540 millones de toneladas de residuos para lograr producir 329,000 kg de oro, es decir, un 0.00006% de aprovechamiento (EPA, 1995).

Ante situaciones como la antes descrita, lo que irremediamente provoca cuando menos una reacción entre la sorpresa y el enojo entre algunos grupos de interés, que las empresas se ven en la necesidad de incorporar dentro de sus reportes de resultados anuales,

Lugar	Compañía	País	Lugar	Compañía	País
1	Anglo American Corp of South Africa Ltd	Sudáfrica	26	Mim Holdings Ltd.	Australia
2	Rio Tinto	Reino Unido	27	Mistui & Co. Ltd.	Japón
3	Broken Hill Pty Co.	Australia	28	Homestake Mining Co.	USA
4	Cia Vale do Rio Doce	Brasil	29	IMC Global Inc.	USA
5	Estatad de Chile	Chile	30	Billiton	Reino Unido
6	Freeport McMoran Koper & Gold Inc	USA	31	Cia Auxiliar de Empresas de Mineracao	Brasil
7	Estatad de India	India	32	Arbed	Luxemburgo
8	Noranda Inc	Canadá	33	Estatad de Suecia	Suecia
9	Phelps Dodge Corp.	USA	34	Estatad de Venezuela	Venezuela
10	Newmont Mining Corp	USA	35	Lonmin	Reino Unido
11	Placer Dome Inc.	Canadá	36	Normandy Mining Ltd.	Australia
12	North Ltd.	Australia	37	Hanson PLC	Reino Unido
13	Gold Fields Ltd.	Sudáfrica	38	BASF AG	Alemania
14	WMC Ltd.	Australia	39	Thyssen Stahl AG	Alemania
15	Teck Corporation	Canadá	40	Trans-World Metals	Suiza
16	Barrick Gold Corp.	Canadá	41	Glencore International	Suiza
17	Inco Ltd.	Canadá	42	Estatad de Zambia	Zambia
18	Asarco Inc.	USA	43	Alcoa	Zambia
19	P.C. of Saskatchewan	Canadá	44	Boliden Ltd.	Canadá
20	Estatad de Botswana	Botswana	45	USX Corp.	USA
21	Iscor Ltd.	Sudáfrica	46	Estatad de Irán	Irán
22	Estatad de Marruecos	Marruecos	47	Estatad de Indonesia	Indonesia
23	Cyprus Arnax Minerals	USA	48	Cia Siderúrgica Nac.	Brasil
24	Ind. Minera México	México	49	Israel Chemical Ltd	Israel
25	Gencor Ltd.	Sudáfrica	50	Peñoles SA de CV	México

**Tabla 1.3.2** Principales 50 compañías mineras a nivel mundial.

indispensable para tomar conciencia de la necesidad de tomar acción en la regulación ambiental y prevención del deterioro del entorno natural.

En relación a estudios similares a este trabajo realizados con anterioridad, quizás el organismo más completo es el United States Geological Survey, organismo que se encarga de recopilar información entre corporaciones tanto de Norteamérica como a nivel país en todo el mundo. En algunos minerales, han realizado estudios completos del flujo de materiales dentro del ciclo de vida de un producto, por lo que estos vendrían a ser antecedentes a este trabajo, aunque es de observarse que nunca se maneja el término “eficiencia” ni se trata de calcular un indicador de desempeño ambiental en base al consumo de materias primas y el producto terminado, sino que se limita meramente a ser información para uso discrecional del usuario. Sólo a últimas fechas es que se manejan índices de eficiencia para aprovechar esa información dispersa en diversas fuentes bibliográficas y realizar un compendio que permita ver de manera rápida cuál es el desempeño ambiental de un proceso, existiendo publicaciones que realizan este ejercicio para algunos metales (Lozano, 1999).

### *1.3 Minería en el mundo*

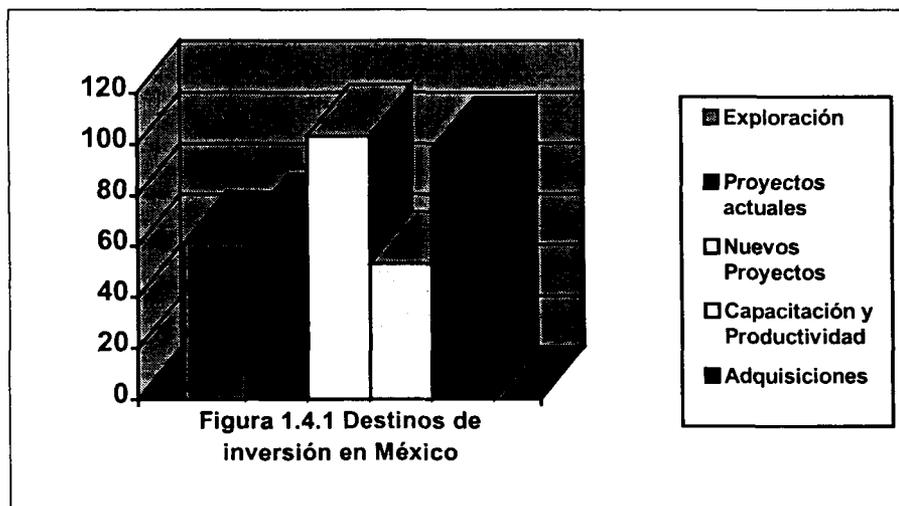
En el año 2001, la inversión mundial para la exploración de yacimientos mineros disminuyó en 15% en comparación del 2000, siendo el valor más bajo en los últimos 9 años. América Latina continua siendo el principal destino de inversión mundial. En la Tabla 1.3.1 se pueden observar las principales regiones destinatarias de inversión para exploración de minerales durante el 2001 (SE, 2002).

<b>Región</b>	<b>Monto (Millones de Dólares)</b>
América Latina	576
Australia	349
África	277
Canadá	333
Estados Unidos de América	158
Sureste Asiático	133
Otros	175

**Tabla 1.3.1** Destinos de inversión en exploración de yacimientos en 2001 (SE, 2002)

En el año 2001, último año a la fecha en el que se publicó el informe de la Minería Mexicana elaborado por la Secretaría de Economía, el volumen físico de la producción minera decayó 5.2% con respecto al año anterior, presuntamente debido a la caída en los precios internacionales de los metales, la contracción de las exportaciones y la depresión en el mercado interno. Para el mismo año, el número de asegurados en el IMSS fue de 262,574 personas que trabajan para compañías minero-metalúrgicas, una pérdida del 8% con respecto al año anterior (SE, 2002).

La inversión total de la industria minera durante el año 2001 fue de 380 millones de dólares, apenas el 55% de lo invertido el año anterior. Este monto se dividió como se indica en la Figura 1.4.1 Cabe mencionar que la inversión extranjera directa fue de 262 millones de dólares en el mismo año, representando una pérdida del 47% con respecto al año anterior. Es apreciable que el año 2001 fue un periodo de contracción para la minería en México y que las empresas del ramo han pasado por tiempos difíciles.



Por otra parte, la regulación en materia ambiental cae bajo el campo de acción de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la cual se rige bajo la Ley Federal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) aprobada desde 1992. Se establece que la exploración y explotación de recursos minerales requieren de un estudio de impacto ambiental de las actividades del proyecto, el cual desemboca en el otorgamiento de la Licencia Ambiental Única, y de ahí en adelante se deben de cumplir las normas ambientales en diferentes rubros tales como calidad de agua, manejo de materiales

En la Tabla 1.3.2 se presenta el listado de las 50 compañías mineras más grandes del mundo de acuerdo a Who owns Who in Mining del año 2000, con el objetivo de conocer quines son los principales productores mineros. Será interesante posteriormente cuáles de estas empresas participan activamente en programas de desarrollo sostenible.

Las fusiones entre corporativos mineros han continuado, en similitud al resto de las industrias internacionales. Este hecho, aunado a una menor disponibilidad de capital para las pequeñas y medianas empresas, son las causas principales en el decremento en el gasto en exploración de nuevos yacimientos (sin mencionar la caída de precios de algunos minerales). Solamente las regiones ricas en diamante y metales de la familia del grupo del platino, tales como África y Canadá, han mantenido presupuestos no tan variados en gastos de exploración (SE, 2002).

#### *1.4 Minería en México*

Para comprender mejor la situación de la minería nacional, es importante señalar que la legislación gubernamental principal en material minera se rige bajo el Artículo 27 de la Constitución Mexicana, de la cual se desprende la Ley Minera publicada en 1992 y revisada en 1996. Esta reforma permitió una mayor participación de capitales privados y extranjeros en la industria, a la vez que apoyó la privatización de paraestatales. Actualmente, los principales materiales que solamente pueden ser aprovechados por el Estado son hidrocarburos, minerales radioactivos algunos tipos de substancias suspendidas o disueltas en aguas subterráneas. El 15 de febrero de 1999 se publicaron nuevas reformas a la Ley las cuales establecen límites en tiempo para trámites administrativos gubernamentales y establecen libertad de acción cuando se llegue al límite de tiempo establecido para dar respuesta a una solicitud.

Actualmente en México las actividades de la minería se encuentran reguladas por la Secretaría de Economía (antes Secretaría de Comercio y Fomento Industrial o SECOFI) desde 1994, cuando la entonces Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP) fue reorganizada como la Secretaría de Energía. La Dirección General de Minas perteneciente a esta Secretaría es la responsable de la concesión de títulos para actividades mineras así como el mantenimiento de registros y mapas mineros.

ferrosos y de los metales preciosos, con 418 y 357 millones de dólares respectivamente como saldo de exportaciones e importaciones. Pero este superávit es mermado por las altas y crecientes importaciones de minerales siderúrgicos y minerales no metálicos. En general, se considera que el grado de inversión de la industria minera nacional ha disminuido principalmente por el alto precio de los combustibles empleados, ya que el gas natural aumentó 478%, la electricidad 44% y el diesel 23%, eso en cifras comparativas entre 1999 y el año 2000.

En la Tabla 1.4.1 se muestra la contribución mundial de México en la producción de ciertos minerales, y el lugar que ocupa en el mundo con dicho porcentaje en el año 2001 (SE, 2002).

<b>Mineral</b>	<b>Lugar Mundial</b>	<b>% de Producción Mundial</b>
Plata	1	14.9
Celestita	2	28.8
Bismuto	2	22.4
Fluorita	2	13.7
Cadmio	3	7.6
Arsénico	3	6.8
Wollastonita	4	6.6
Grafito	5	3.2
Zinc	6	4.8
Diatomita	6	3.6
Plomo	6	4.6
Molibdeno	6	4.2
Barita	6	3.6
Sal	6	4
Manganeso	8	1.4
Yeso	9	3.5
Feldespató	9	3.6
Cobre	11	2.7

**Tabla 1.4.1** Participación de México en la producción mundial de minas.

peligrosos, calidad de suelo, emisiones y desechos, así como almacenamiento de combustibles y utilización de energía.

México es indudablemente un país rico en minerales, los cuales contribuyeron significativamente por mucho tiempo al desarrollo económico de la nación independiente. En la Figura 1.4.2 se puede observar un mapa de la República Mexicana que ilustra la gran variedad de minerales que son aprovechados en distintos puntos del país (USGS, 1995).

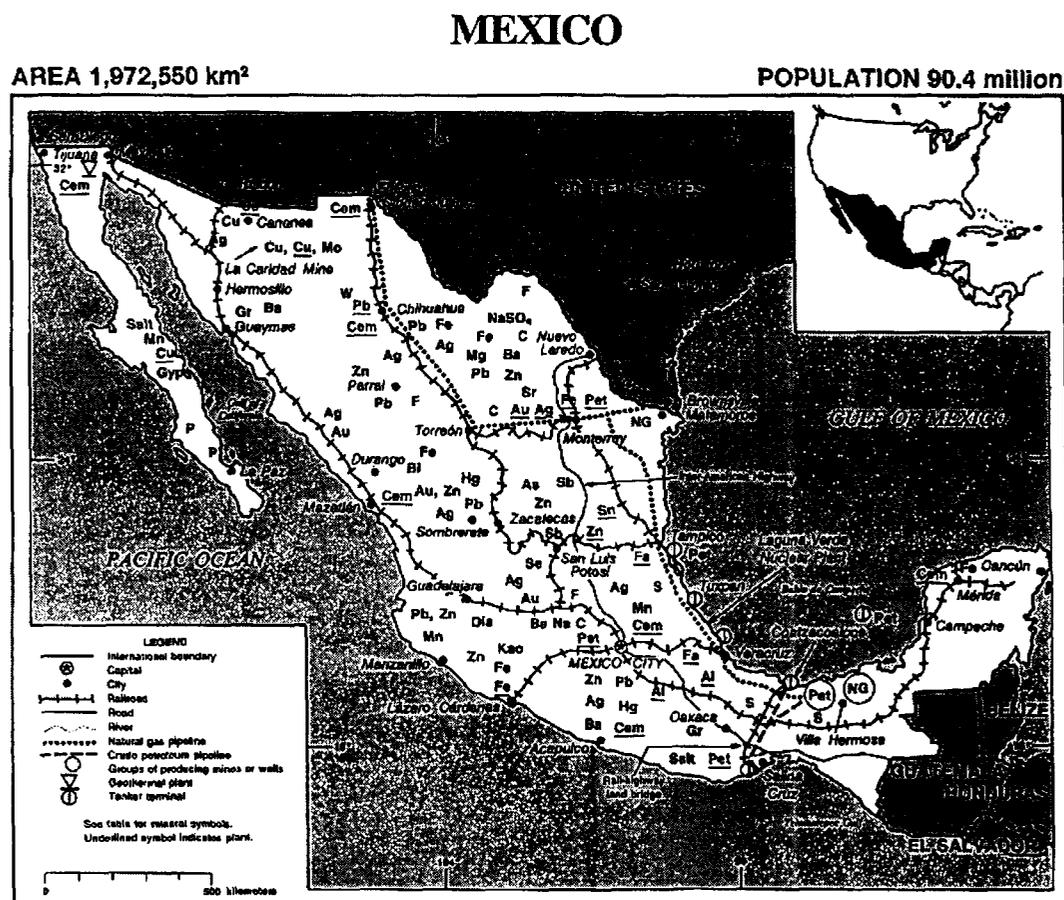
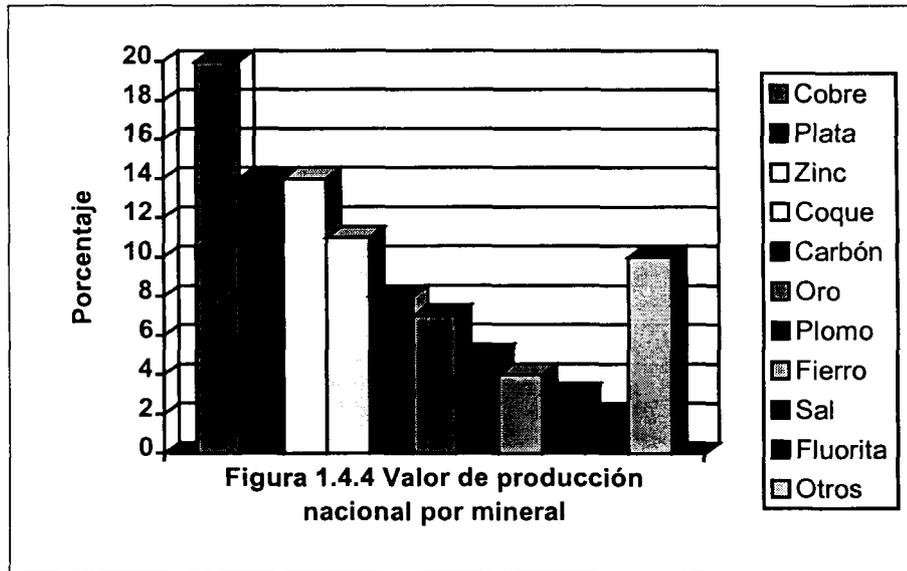


Figura 1.4.2 Mapa minero de México

Sin embargo, la recesión persistente en la industria minera mundial ha afectado el desarrollo económico de las empresas del ramo, y en México no ha sido la excepción. En 2001, la balanza comercial del país continúa presentando un superávit de 341 millones de dólares, lo que es una disminución del 26.1% en comparación del año 2000 (SE, 2002). La principal fuente de ingresos por exportaciones proviene de los minerales industriales no

En cuanto a el valor de la producción nacional en el 2001, en la Figura 1.4.4 se puede observar la participación de los diferentes minerales.



Además de los metales y minerales que posicionan a México dentro de los primeros lugares del mercado mundial mencionados en la Tabla 1.4.2, existen otros materiales que son importantes fuentes de recursos económicos para México como es el caso del cemento, que representa un mercado en el país de \$5,020 millones de dólares al año y en el que México tiene la tercera compañía productora a nivel mundial (SE, 2002).

En términos económicos, la contribución del sector minero-metalúrgico durante el 2001 alcanzó los 28 mil millones de pesos, dividida esta aportación como lo muestra la Figura 1.4.3. Esta cifra fue 7.5% menor a la del año anterior, lo que refleja la crisis que ha sufrido el sector minero (SE, 2002)



La producción nacional está localizada principalmente en algunas regiones. En la Tabla 1.4.2 se observa la contribución de los principales estados mineros durante 2001 (Ibidem).

Mineral	Sonora	Zacatecas	Chihuahua	Durango	Guanajuato	SLP	Coahuila	BCS
Oro	27			25	13			
Cobre	82	6				4		
Grafito	100							
Molibdeno	100							
Barita	11						11	
Plomo		20	50					
Zinc		28	30			15		
Cadmio		45	38					
Plata		42	12	12				
Fluorita				3		73	23	
Celestita		1					99	
Fierro							36	
Sal								78

**Tabla 1.4.2 Participación de los principales estados mineros de México.**

## Capítulo 2

### Marco Teórico

#### *2.1 La Minería y el Desarrollo Sostenible*

Es importante para ubicar mejor el entorno mundial conocer los diferentes organismos internacionales que trabajan en pro del desarrollo sostenible, y la interacción que tienen estas instituciones con la industria minera. El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) es el organismo responsable de coordinar esfuerzos multinacionales que luchan por el desarrollo sostenible de las naciones, y destaca por ofrecer una guía de información y recomendaciones sobre procedimientos y buenas prácticas de manufactura para la industria minera, así como promover empresas responsables ambientalmente. También el Banco Mundial patrocina actividades y talleres enfocados a definir políticas ambientales y políticas que sean aceptadas por los países beneficiarios que buscan un mayor desarrollo.

La UNEP tiene injerencia en muchos sectores industriales, uno de los cuales es la minería. Algunas acciones generales que toma son análisis de impacto ambiental con el fin de prevenir accidentes y desarrollar procedimientos de medidas de contingencia, así como el impulso a instituciones financieras del grupo del Banco Mundial para que apoyen a las empresas que promuevan el desarrollo mineral sostenible. Uno de los retos más grandes que afrontan en el siglo XXI es la disponibilidad de agua, ya que la mayoría de los países mineros tienen escasez del vital líquido (UNEP, 2000). También se pueden contar como retos el uso de energía, el abandono de minas, áreas naturales protegidas y manejo de químicos peligrosos.

Los principios de Producción Más Limpia son aplicados por la UNEP para delimitar su principal objetivo: “eliminar la producción y uso de sustancias persistentes y bioacumulables, incluyendo metales pesados, que afectan la salud humana y el ambiente”. En el I Foro Global de Ministerios Ambientales, celebrado en mayo de 2000 y conocido como la Declaración de Malmö, se declaró que “las instituciones y entidades regulatorias gubernamentales, en interacción con el sector privado, deben ser capaces de crear una nueva cultura de contabilidad ambiental, mediante la aplicación del principio *polluter-pays*,

indicadores de calidad ambiental y su reporte, y el establecimiento de decisiones de inversión y tecnología con enfoque preventivo.”

En el 2000 también fue creado la Iniciativa Global Minera (GMI), formada por directores de las principales empresas mineras del mundo, con el fin de asegurar que la industria trabaje en conjunto bajo un marco de desarrollo económico sostenible. Este grupo lanzó el proyecto denominado Desarrollo Sostenible de Aprovechamiento de Minerales (MMSD) que busca identificar “la mejor manera de que la minería y los minerales contribuyan en la transición global al desarrollo sostenible”. El mismo Secretario General de la ONU, Kofi Annan, ha declarado que “las empresas transnacionales son las primeras beneficiadas con la globalización, por lo que deben aceptar su parte de responsabilidad en el manejo de sus consecuencias.”

Sin duda, el reporte público de información ambiental ha sido objeto de polémica y sometida a discusión por la transparencia con la que se maneje. Por eso la UNEP, en conjunto con la Coalición de Economías Ambientalmente Responsables (CERES), patrocina la Iniciativa de Información Globalizada (GRI), organismo que promueve el reporte de información ambiental entre las corporaciones al mismo nivel de importancia que se publica un reporte de estados financieros para los accionistas.

En la Tabla 2.1.1 se enlistan algunos de los posibles impactos ambientales generados por la minería, tal como lo establece la UNEP.

Impacto ambiental
○ Destrucción del hábitat en la mina y sitio de disposición
○ Destrucción de hábitats vecinos por emisiones y descargas
○ Destrucción de hábitats vecinos por el arribo de inmigrantes
○ Cambios en suelo y agua de ríos por la modificación de flujos subterráneos
○ Alteración en la hidrología del lugar
○ Cambios en geología
○ Erosión de la tierra por inadecuada rehabilitación del suelo
○ Inestabilidad del suelo
○ Peligro por falla de estructuras y presas
○ Equipo, planta y edificios abandonados

<p><b>Impacto contaminante</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Filtración de fluidos de la mina</li> <li>○ Deslave de sedimentos de la mina</li> <li>○ Operación cercana a cuencas de agua</li> <li>○ Efluentes propios de operaciones mineras</li> <li>○ Derrames de aceite y combustible</li> <li>○ Suelo contaminado por tratamiento de residuos y derrame de químicos</li> <li>○ Lixiviados de residuos y áreas de disposición final</li> <li>○ Emisiones al aire, incluye polvos que afectan otros hábitats</li> <li>○ Descarga de metano de las minas</li> </ul>
<p><b>Impacto en salud ocupacional</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Manejo de químicos, residuos y productos</li> <li>○ Inhalación de polvos</li> <li>○ Emisiones fugitivas de la planta</li> <li>○ Emisiones en espacios confinados</li> <li>○ Exposición a materiales tóxicos</li> <li>○ Exposición a calor, ruido, vibraciones</li> <li>○ Riesgos físicos en la planta y la mina</li> <li>○ Condiciones de vida antihigiénicas</li> </ul>

**Tabla 2.1.1** Impacto ambiental ocasionado por actividades de la minería

A nivel regional, en 1993 se creó la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norteamérica (CEC), la cual tiene por objetivo resolver problemáticas ambientales de la zona, la prevención de potenciales conflictos comerciales y ambientales, así como procurar el cumplimiento cabal de la legislación ambiental.

Las convenciones internacionales sobre medio ambiente, también llamadas acuerdos ambientales multilaterales, han sido desarrolladas para atender problemáticas ambientales globales. Si bien generalmente no son específicas sobre la industria minera, los acuerdos y obligaciones que se logran en ocasiones llegan a impactar los procesos mineros. Estos acuerdos se vuelven documentos legales una vez que un mínimo de países aprueban su contenido. Ejemplos de convenciones son los Protocolos de Montreal y Kyoto,

fundamentados en las convenciones de Viena y Cambio Climático respectivamente. Por otro lado, existen encuentros internacionales que proveen de guías y recomendaciones para los países, aunque no constituyen documentos legales *per se*. Ejemplos de lo anterior, también llamadas “leyes suaves” son el Programa de Producción Más Limpia de la UNEP, Agenda 21 y las guías de Berlín. En la Tabla 2.1.2 se enlistan las Convenciones internacionales sobre medio ambiente con temas que tocan la minería (UNEP, 2000).

Año	Convención Internacional
1971	Pantanos.- Plan de acción para la conservación de los pantanos y sus recursos
1972	Protección del Patrimonio Cultural de la Humanidad de la UNESCO
1973	Prevención de contaminación de mares por desecho de residuos.- Controles para prevenir daños por tirar residuos como metales pesados tal que afecten la vida humana, recursos naturales o fauna acuática
1979	Contaminación atmosférica transfronteriza.- Combatir los efectos de acidez y contaminación por emisiones al aire y su transporte
1982	Ley Marítima.- Medidas para prevenir, reducir y controlar la contaminación de los medios acuáticos
1989	Control de transporte transfronterizo de Residuos peligrosos y su disposición final.- También llamada de Basel, en 1999 añadió un Protocolo que establece reglamentos y compensaciones por daños originados por derrames de residuos peligrosos
1991	Tratado de la Antártica sobre Protección Ambiental.- Prohíbe la explotación de recursos minerales en el Ártico cuyos fines no sean la investigación
1992	Cambio Climático de la ONU.- Sobre las emisiones de los gases relacionados con el efecto invernadero, fue ratificado en 1997 con el Protocolo de Kyoto, que compromete a los países a disminuir sus emisiones de 6 gases: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC's, PFC's y SF <sub>6</sub> .
1993	Diversidad Biológica.- Sobre la pérdida de biodiversidad
1998	Procedimiento para el comercio mundial de químicos peligrosos y pesticidas
2000	Efectos transnacionales de Accidentes Industriales.- Enfocada a proteger a la gente y el ambiente contra accidentes
2000	Contaminantes Orgánicos Persistentes en el Futuro.- Sobre dioxinas y furanos

**Tabla 2.1.2** Convenciones Ambientales Internacionales con efectos en la industria minera

A continuación se enlistan los principios fundamentales para el sector minero enunciados en las guías de Berlín, creadas en 1991 y revisadas en 1999, en las que se recomiendan los puntos mínimos que deben alcanzar los gobiernos y empresas de minerales.

1. Dar alta prioridad a la administración ambiental, que incluya estudios de impacto ambiental, control de contaminantes, monitoreo y auditoría de actividades y procedimientos de respuesta durante emergencias.
2. Realizar estudios de impacto socio-económicos de las operaciones mineras, incluyendo discusiones con el género.
3. Utilizar en la alta administración la contabilidad ambiental en industria y gobierno.
4. Crear conciencia a los empleados de todos los niveles de su responsabilidad dentro de la administración ambiental.
5. Asegurar la participación y diálogo con las comunidades afectadas por actividades mineras, incluyendo grupos marginados.
6. Especialmente en ausencia de regulaciones ambientales, adoptar buenas prácticas de minimización de degradación ambiental.
7. Adoptar tecnologías amigables con el ambiente en todas las etapas de los procesos mineros.
8. Buscar fondos adicionales para mejorar el desempeño ambiental de operaciones mineras ya existentes.
9. Incluir el análisis de riesgo en la administración del desarrollo de regulaciones para actividades mineras, incluyendo el manejo de los residuos peligrosos.
10. Reforzar la infraestructura, sistemas de información, entrenamiento y habilidades en la administración ambiental.
11. Evitar el uso de regulaciones ambientales como barreras innecesarias en el comercio y la inversión.
12. Reconocer la relación entre las condiciones ecológicas, condiciones socio-culturales, salud humana, la comunidad y el medio ambiente.
13. Adoptar cuando sea apropiado, instrumentos económicos como incentivos fiscales que premien la disminución de emisiones contaminantes.

14. Explorar la posibilidad de acuerdos recíprocos para reducir la contaminación transfronteriza.
15. Alentar la inversión minera a largo plazo mediante estándares claros con criterios y procedimientos que puedan ser estables y predecibles.

Continuando con la lista de esfuerzos internacionales por el desarrollo sostenible, en agosto de 2002 se celebró en Johannesburgo, Sudáfrica, la Cumbre Mundial Sobre Medio Ambiente, también conocida como Río+10, en la que la mayoría de los países discutieron sobre el estado ambiental del mundo. En cuanto a la industria minera, 38 países, incluyendo México, apoyaron el acuerdo denominado “Diálogo Global sobre Minería, Metales y Desarrollo Sostenible”. Este es un esfuerzo liderado por Canadá y Sudáfrica que tiene por objetivo establecer un foro intergubernamental de alto nivel que tienen intereses afines en el sector de minerales no-energéticos y metales, y que debe desembocar en políticas que promuevan el desarrollo sostenible dentro del sector de minerales y metales. En la Cumbre Mundial se definió que los minerales “son una parte esencial de la vida moderna” y el sector contribuye al desarrollo económico y social de muchos países. Es importante esta aclaración ya que en la Cumbre de Rio de Janeiro de 1992, si bien se enfocó en el desarrollo sostenible y derivó en la creación del programa de Agenda 21, se omitió la participación de la industria minera.

Este “Diálogo Global” invita a los países a promover ideas y procedimientos de trabajo para su primera reunión intergubernamental a celebrarse en Sudáfrica en febrero de 2004. Se busca el intercambio de información y la discusión de políticas, temas y regulaciones sobre los minerales y metales en el desarrollo sostenible. Este es un esfuerzo internacional que refleja el interés de mantener la participación de la industria minera en la toma de decisiones a nivel internacional tal que refleje la contribución de la minería al desarrollo económico de las naciones.

Cabe mencionar que los acuerdos que permitan el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible deben superar las fronteras entre países a fin de tener una eficacia global, lo cual no siempre es fácil realizar, debido entre otras razones, a que por cuestiones políticas, en ocasiones los movimientos nacionalistas de muchos países, bajo el escudo de la protección de la soberanía nacional y rechazo a leyes provenientes del extranjero,

impiden la implantación de políticas comunes entre naciones. Agenda 21 trata de enfatizar que las regulaciones ambientales deben ser apropiadas a la cultura nacional, prioridades y capacidad de los países (Shields, 2000). Sin embargo, es de señalar que ante la ausencia de ayuda de las potencias mundiales, los países pobres no pueden tener lujos como implementar y vigilar leyes ambientales estrictas. Eso hay que sopesarlo con el hecho que si muchos países caen en esta situación de baja preocupación ambiental, el objetivo global del desarrollo sostenible no podrá cumplirse en el largo plazo, por lo que naciones ricas y pobres sufrirían las consecuencias.

Dentro de Agenda 21, los temas que afectan directamente a la industria minera y que fueron ratificados en 1997, hablan de Planeación y Administración de recursos del suelo, Deforestación, Atmósfera, Océanos y Mares, Agua dulce, Químicos tóxicos, Residuos Peligrosos, y Negocios e Industria (UNEP, 2000).

Las potencias mundiales hablan de programas de reducción de uso de materiales con el fin de que las naciones en desarrollo eleven su consumo. Sin embargo, es difícil la implementación de esta idea de menor consumo de la población ya que los mecanismos existentes que pueden utilizarse, comúnmente los impuestos, son impopulares y convierten el problema en una situación política delicada para aquel que se atreva a lanzar iniciativas de este tipo y sin haberlas consensuado con el resto de las fuerzas políticas.

## *2.2 Ecoeficiencia*

En 1991, el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) se reunió para tratar de definir en un término el fin económico del desarrollo sostenible. Sin embargo, no encontraron alguna palabra vigente que definiera lo que ellos buscaban, por lo que acuñaron el término “ecoeficiencia”, que en fines prácticos se define como “la mayor creación de bienes y servicios con el menor empleo de recursos, residuos y contaminación” (Schmidheiny). La definición completa establecida por la UNEP menciona la ecoeficiencia como “la entrega de productos y servicios a precio competitivo, que satisfagan las necesidades humanas y brinden calidad de vida, a la vez que reduce el impacto ecológico y la intensidad de uso de recursos a lo largo del ciclo de vida de acuerdo a la capacidad estimada de la Tierra” (UNEP).

El término ecoeficiencia se adjudica a los investigadores Schaltegger y Sturm en 1990. Sin embargo, el concepto de la conveniencia de las inversiones en la prevención de la contaminación y la minimización de residuos datan de al menos 15 años antes de esa fecha (Verfaillie, 2000), ya que la corporación 3M había creado desde entonces su programa 3P (acrónimo en inglés de Pollution Prevention Pays), seguido del programa de Dow Chemicals WRAP (Waste Reduction Always Pays). Ambos esfuerzos redituaron en ahorros en cientos de millones de dólares y sentaron importantes bases para el interés de otras grandes corporaciones.

Actualmente, el WBCSD considera que los indicadores de ecoeficiencia, si bien han sido adoptados por algunas de las mayores compañías a nivel mundial, es necesario que tenga mayor promoción por parte de los gobiernos. El Consejo considera que los subsidios gubernamentales y la falta de cumplimiento de empresas en las regulaciones ambientales, hace que la ecoeficiencia no sea “negocio” para los que sí toman medidas al respecto. Por lo anterior, urgen a los gobiernos a aplicar la ley y castigar a quienes no toman esfuerzos por contaminar menos.

Actualmente, existen esfuerzos por parte de algunas naciones y regiones que han logrado consensos tales que trazan indicadores de ecoeficiencia con objetivos reales y apropiados. Aún así, es responsabilidad de los gobiernos fomentar políticas que obliguen a todos y no sólo unos cuantos, a buscar mejores procesos. Para esto, el WBCSD recomienda trabajar en cinco puntos (Verfaillie, 2000):

- Identificación y eliminación de subsidios dañinos.
- Internalización de costos ambientales.
- Promover impuestos sobre uso de recursos y contaminación en vez de impuestos al trabajo y las utilidades.
- Desarrollo e implementación de instrumentos económicos.
- Promoción de iniciativas voluntarias y acuerdos negociados.

Algunos críticos del uso de la ecoeficiencia argumentan que solamente es alcanzable para los países ricos, pero que las economías pobres no pueden permitirse los altos costos de la prevención de la contaminación, además que requieren de una mayor aplicación de las leyes y ayuda económica considerable. La opinión del WBCSD disiente de lo anterior y considera que la eficiencia dará una auténtica rentabilidad una vez que los costos

ambientales del uso de recursos y emisión de contaminantes sean reales, por lo que insiste en la necesidad del apoyo del gobierno en la aplicación de los principios de ecoeficiencia (Ibidem). Lamentablemente y como se ha visto en muchos lugares, incluyendo a México, decisiones de este tipo se toman de carácter político y se sacrifican reformas estructurales por temor a “pagar la factura” y perder votos en las siguientes elecciones.

Por otra parte, en 1998 se creó la Iniciativa Europea para la Ecoeficiencia (EEEI), la cual promueve la difusión de este concepto y la creación de planes de acción. Este grupo se está enfocando particularmente a las naciones de Europa Central y Oriental, de las cuales la mayoría están en proceso de entrada o admisión a la Unión Europea, donde encontrarán regulaciones ambientales mayores a las que han tenido vigentes.

La Agencia Ambiental Europea (EEA) maneja también indicadores de ecoeficiencia, con el fin de medir y comparar entre sí a los diversos sectores económicos y países de la Unión Europea.

La ecoeficiencia es una filosofía de administración que promueve la búsqueda de mejoras ambientales que sean acompañadas de beneficios económicos. Permite a las empresas ser más responsables ambientalmente y redituables económicamente, a la vez que alienta la innovación y por ende el crecimiento y la competitividad.

La definición completa de ecoeficiencia del WBCSD es muy similar a la de la UNPE, ya que es “la entrega de bienes y servicios a precio competitivo que satisfagan las necesidades humanas y ofrezcan una calidad de vida, al tiempo que reduce el impacto ecológico y la intensidad de recursos a través del ciclo de vida y que esté alineado a la capacidad del planeta”.

Se considera que la ecoeficiencia no se limita a mediciones en la planta de producción, sino que abarca toda la cadena de abasto durante el ciclo de vida de un producto. La ecoeficiencia tiene tres objetivos generales (Verfaillie, 2000):

- Reducción del consumo de recursos; incluye la minimización de energía, materiales, agua y suelo, promoviendo el reciclaje y duración del producto.
- Reducción del impacto en la naturaleza; incluye la minimización de emisiones de aire, descargas de agua, disposición de residuos y dispersión de tóxicos.

- Aumento de valor del producto o servicio; incluye mayores beneficios a consumidores al buscar un enfoque de detección real de las necesidades de los consumidores tal que reciban el mismo beneficio con menos recursos.

En una compañía, estos objetivos pueden o no involucrar la creación de un Sistema de Administración Ambiental (EMS), tal que tenga por objetivo la búsqueda permanente y seguimiento de acciones necesarias para el logro de procedimientos ecoeficientes.

Las empresas que utilizan Sistemas de Administración Ambiental se ven beneficiadas del conocimiento del concepto de ecoeficiencia porque sus sistemas internos deben estar enfocados hacia la mejora continua. Si una empresa busca certificarse bajo un organismo externo y una norma internacional, como EMAS o ISO 14000, encontrará que el uso de indicadores como la ecoeficiencia le facilitará la evaluación de su EMS.

Las acciones generales que una empresa puede tomar para mejorar la ecoeficiencia de sus procesos son cuatro básicamente:

- Reingeniería de procesos; ahorro en costos y reducción de contaminación.
- Revaloración de productos; subproductos que antes se tiraban se pueden comercializar como materia prima para otras empresas.
- Rediseño de productos; mismo uso con mejor funcionalidad.
- Redefinen las necesidades de los consumidores; no sólo innovan un producto, sino que en conjunto cliente-proveedor satisfacen una necesidad con un producto menos intensivo en materiales y energía.

El Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible ha identificado también siete elementos que contribuyen a la mejora en la ecoeficiencia, los cuales contribuirán al cumplimiento de los tres objetivos generales previamente mencionados:

- Reducción en la intensidad de uso de materiales.
- Reducción en la intensidad de uso de energía.
- Reducción en la dispersión de sustancias tóxicas.
- Aumentar el uso de reciclaje.
- Maximizar el uso de recursos renovables.
- Extender la vida útil de un producto.
- Incrementar la intensidad de servicio.

Así también, el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible propone 12 planes de acción a realizar por diferentes grupos de interés que de seguirse, ayudarán al progreso de las naciones hacia un futuro ecoeficiente. Estos puntos se observan en la Tabla 2.2.1 (Verfaillie, 2000).

<b>Grupo</b>	<b>Pasos</b>
Líderes gubernamentales y servidores públicos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fijar objetivos macroeconómicos de ecoeficiencia</li> <li>2. Crear políticas integrales en pro de la ecoeficiencia (reformas fiscales)</li> <li>3. Promover políticas internacionales y sistemas de comercio que apoyen la productividad de recursos y reducción de emisiones, así como mejoras para los menos privilegiados</li> </ol>
Sociedad civil y consumidores	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Promover el consumo de productos y servicios ecoeficientes y sostenibles</li> <li>5. Apoyar reformas políticas que premien la ecoeficiencia</li> </ol>
Educadores	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Incluir el manejo de ecoeficiencia y sostenibilidad en los programas de estudio a partir de educación media superior y universidades</li> </ol>
Analistas financieros e inversionistas	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Reconocer y recompensar la ecoeficiencia y sostenibilidad como criterios de inversión</li> <li>8. Apoyar la difusión en mercados financieros del progreso y beneficios obtenidos por las compañías ecoeficientes</li> <li>9. Utilizar herramientas de sostenibilidad en los mercados financieros y promover el entendimiento de los mismos</li> </ol>
Líderes de negocios	<ol style="list-style-type: none"> <li>10. Incluir la ecoeficiencia en su estrategia de negocios</li> <li>11. Reportar el desempeño ambiental a los accionistas y grupos de interés</li> <li>12. Adoptar políticas que recompensen la ecoeficiencia</li> </ol>

**Tabla 2.2.1** Planes de acción del WBCSD para apoyar el desarrollo de la ecoeficiencia

La Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, por su parte, define la ecoeficiencia como “la eficiencia con la cual los recursos ecológicos son utilizados para satisfacer las necesidades humanas”, y la mide como la relación entre el valor de los bienes y servicios que son salida de un proceso dividido por la entrada a ese mismo proceso.

El concepto de ecoeficiencia está fuertemente ligado con la herramienta denominada “Factor 4”, que tiene por objetivo duplicar los ingresos recibidos de un bien, utilizando la mitad de los recursos necesarios previamente.

Una forma de representar la ecuación de la ecoeficiencia es propuesta inicialmente por el WBCSD de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Valor del producto o servicio}}{\text{Influencia ambiental}}$$

La ecuación anterior puede ser interpretada y ajustada según las necesidades de cada proceso que quiera ser medido.

El Consejo propone que los índices de ecoeficiencia pueden ser aplicados internamente en las organizaciones como una administración rutinaria del sistema, incluido en los procesos de toma de decisiones y de comunicación, mientras que de forma externa pueden integrar los indicadores en sus reportes ambientales o financieros para información de accionistas y público en general.

La norma ISO 14031 define la evaluación de desempeño ambiental como “un proceso interno diseñado para ofrecer a la administración información relevante y verificable de manera periódica para determinar si el desempeño ambiental de una organización cumple con los requisitos definidos por la administración” (Jasch, 2000). La serie de normas ISO 14000 requieren un compromiso expreso de la organización para lograr la mejora continua del desempeño ambiental, que si bien no exige el uso de indicadores, se ha encontrado que éstos son de gran utilidad en la definición de objetivos ambientales y publicación de información ambiental comprensible.

Un sistema de administración ambiental, basados en normativas como ISO 14000 o EMAS, debe tener indicadores cuyos objetivos sean:

- Comparación del desempeño ambiental a través del tiempo
- Enfocados en puntos potenciales de optimización
- Obtención y compromiso de metas ambientales

- Identificación de oportunidades de mercado y reducciones potenciales de costos
- Benchmarking
- Herramientas para elaborar reportes ambientales
- Mecanismos de retroalimentación y motivación para la fuerza de trabajo
- Apoyados en normas internacionales

La norma ISO 14031 considera el análisis de balance de materiales como la base para los indicadores operativos, lo que también sirve para ofrecer una metodología de medición común internacionalmente y que sea comprensible. Esta norma tiene la ventaja que se fundamenta en teorías difundidas globalmente como protección ambiental, producción más limpia, desarrollo sostenible y acceso a información de logros obtenidos, sin demandar a las empresas certificadas un mayor sistema de documentación y procedimientos tal como lo requiere la norma ISO 14001.

### *2.3 Medición de Ecoeficiencia*

El Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible propone un marco de trabajo que contiene tres niveles de información sobre ecoeficiencia: categorías, aspectos e indicadores. Esta misma terminología es adoptada por la serie de normas ISO 14000.

Las categorías son áreas grandes que tienen una influencia ambiental o un valor de negocios. Ejemplos de categorías pueden ser el valor de un producto, la influencia ambiental de la creación de un producto o del uso de un producto.

Los aspectos son los componentes de las categorías, los cuales contienen información general sobre una categoría específica, y su función es describir qué es lo que se va a medir. Algunos ejemplos son unidades de moneda, volumen, masa, desempeño, consumo de materiales y energía, descarga de residuos y emisiones.

Los indicadores son las mediciones específicas de cada aspecto que permiten mostrar el desempeño de un proceso. Los indicadores pueden ser muy variados y se citarán algunos a lo largo de este trabajo.

Las organizaciones eligen trabajar con indicadores porque les permite diversas ventajas: seguimiento del desempeño de un proceso, así como la identificación y clasificación de áreas de oportunidad de mejora. Los indicadores, incluyendo los de ecoeficiencia, permiten

tomar decisiones más fundamentadas para los ejecutivos. Así también, el manejo de indicadores permite manejar un lenguaje comprensible con los agentes externos con interés en la organización, como inversionistas, consumidores, auditores y demás.

Los indicadores pueden ser muy diversos ya que dependen del usuario que tenga interés en esa información. Por ejemplo, un gerente de planta tendrá un interés en conocer la relación entre bienes producidos y cantidad de energía empleada, mientras que un analista financiero preferirá conocer el valor económico de los bienes vendidos en relación con la cantidad de energía utilizada.

El WBCSD considera que los indicadores deben regirse bajo los siguientes ocho principios:

- Ser relevantes y significativos para la protección del ambiente, la salud humana y la mejora de calidad de vida: deben enfocarse a la necesidad de mejorar el desempeño ambiental de una parte del proceso.
- Fundamentar toma de decisiones para la mejora de la organización: tanto agentes internos como externos pueden basarse en ellos para tomar decisiones.
- Reconocer la diversidad inherente de los negocios: los indicadores de un tipo de industria son diferentes a empresas de otro ramo, y cada una debe ser evaluada por diferente sector.
- Apoyar el “benchmarking” y monitoreo en el tiempo: el aprendizaje entre organizaciones es más fácil si manejan mediciones similares para sus procesos.
- Ser claramente definidos, medibles, transparentes y verificables: deben estar fundamentados en metodologías aprobadas.
- Ser comprensibles y significativas para grupos de interés identificados: tanto internos como externos deben saber interpretar de la misma forma la información.
- Basados en una evaluación general de la compañía y enfocadas a áreas donde se tenga control directo: a las empresas les sirve cómo los indicadores se ven afectados si cambian sus materias primas, uso de recursos, características del producto y distribución de los mismos (enfoque “gate-to-gate”).
- Reconocer asuntos relevantes y significativos a lo largo de la cadena de valor del producto: las organizaciones también deben interesarse, aunque hacer la diferenciación

correspondiente, en la ecoeficiencia de sus proveedores (cradle-to-gate) y la disposición final por parte de los consumidores (gate-to-grave).

Se define también que los indicadores generalmente pueden ser de dos tipos: con aplicación general o específicos del negocio. Los de aplicación general, aunque pueden ser utilizados en casi todas las compañías, pueden tener diferente grado de importancia. Se considera que para ser de aplicación general deben tener las siguientes características: relacionados a una preocupación ambiental global, relevante para la mayoría de los negocios, y que los métodos de medición son establecidos y aceptados globalmente. Aquellos indicadores que no cumplan con estas características se denominan como específicos del negocio.

El WBCSD realizó un estudio entre empresas de diferentes ramos y encontró que los indicadores de aplicación general que son aceptados según las categorías definidas previamente son:

- Valor del producto o servicio: Cantidad de bienes o servicios producidos a los clientes, ventas netas.
- Influencia ambiental en la creación del producto o servicio: Consumo de energía, consumo de materiales, consumo de agua, emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) y de sustancias que atacan la capa de ozono (ODS).
- Influencia ambiental en el uso del producto o servicio: Ninguno.

Los indicadores anteriores son recomendados por el WBCSD para reportarse por todas las empresas, aunque deben combinarse con indicadores específicos al negocio, de tal manera que generen un perfil de desempeño de ecoeficiencia de la organización.

En la tabla 2.3.1 se muestra información sobre los tipos de indicadores, unidades de medición, así como métodos para lo mismo y la posible fuente de información.

El tema específico de la minería pudiera ser considerado un caso aparte, ya que las condiciones que se presentan son particulares. Para empezar, al ser un “commodity”, existen fluctuaciones en los precios de los productos de un año a otro sin que se hayan dado cambios operacionales en las empresas, por lo que el indicador de “Ventas netas” pudiera ser no tan significativo.

Indicador	Unidad	Método de medición	Fuente de datos
Cantidad de producto	Piezas, masa	Masa, piezas producidas o vendidas	Reportes financieros o de producción
Ventas netas	Dólares, euros, moneda local	Principios de Contabilidad Aceptados, Estándares	Reportes financieros
Consumo de energía	Gigajoules	Cantidad de energía consumida	Reportes de planta, literatura
Consumo de materiales	Toneladas métricas	Específicos para cada compañía	Reportes de planta y de costos
Consumo de agua	Metros cúbicos	Específicos para cada compañía	Reportes de planta y de costos
Emisiones de ODS	Toneladas equivalentes de CFC11	Según Protocolo de Montreal	Estimaciones, reportes ambientales
Emisiones de GHG	Toneladas equivalentes de CO <sub>2</sub>	Según Protocolo de Kyoto	Estimaciones, reportes ambientales

**Tabla 2.3.1** Tipos de indicadores de ecoeficiencia

En la minería, la influencia ambiental deriva de las operaciones de extracción principalmente, por lo que es más útil conocer las cantidades de materiales removidos en la producción de un bien. Así también, debido a que los diferentes minerales y metales producidos son reportados en diferentes unidades, no es conveniente obtener un indicador global de bienes producidos, sino que es preferible la disección en cada producto.

La norma ISO 14031, “Evaluación del Desempeño Ambiental”, puede ser utilizada para la selección de los indicadores específicos de la organización. Por su parte, EMAS en su artículo 5, recomienda el uso de indicadores, ya sean absolutos o relativos a las unidades producidas por la organización, tales como consumo de materias primas, de energía y agua, consumo de residuos, residuos totales, calidad de residuos, aguas residuales y emisiones a la atmósfera (Jasch,2000).

Otra característica importante de las guías contenidas en la norma ISO 14031 es que utilizan el modelo de análisis de flujo de materiales como base para los indicadores a nivel operativo, toda vez que ofrecen una metodología más aceptada por la comunidad internacional.

Una recomendación que algunos expertos hacen es que si una organización no quiere someterse a los lineamientos de la norma ISO 14001, que le requieren de mayores esfuerzos en documentación de procedimientos, puede adoptar la norma ISO 14031 como guía porque se enfoca en situaciones más operativas relacionadas con protección ambiental, producción más limpia, desarrollo sostenible y reporte ambiental (Jasch, 2000). Dado que la única norma que puede ser certificada por organismos terceros dentro de la familia 14000 es la 14001, la adopción de la guía ISO 14031 aplica para empresas que no sean obligadas a certificarse por otra organización, pero interesadas en el desarrollo de mejoras ambientales.

#### *2.4 Perfil de ecoeficiencia*

Dado que no existe un formato generalmente utilizado para reportar la información sobre ecoeficiencia de una organización, el WBCSD propone el patrón presentado en la Tabla 2.4.1, el cual consta de cinco elementos principales: perfil de la organización, perfil económico, perfil ambiental, índice de ecoeficiencia e información sobre la metodología.

En un estudio del WBCSD realizado entre 29 reportes se encontró que el formato recomendado todavía no es utilizado por completo. Por mencionar ejemplos:

- Las empresas reportan ventas netas, pero sólo un tercio reporta cantidades de producto
- La mayoría reportan consumo de agua y energía, pero solamente un 20% lo hacen para consumo de materiales.
- El 60% reportan datos relacionados con emisiones de GHG, pero pocos lo hacen para emisiones de ODS.
- Rara vez utilizan objetivos para sus indicadores (o que sean reportados).

Algunas compañías mineras a nivel mundial que colaboran con el WBCSD en proyectos de interés global son Broken Hill Proprietary (Australia), Companhia Vale do Rio Doce (Brasil), Noranda (Canadá), Rio Tinto (Reino Unido) y WMC Limited (Australia).

Mientras tanto, las empresas mexicanas de diversos ramos que participan dentro del grupo de trabajo del WBCSD son Grupo Vitro, IMSA y Cemex, todas con oficinas centrales en Monterrey, Nuevo León.

Perfil de la organización	
Compañía	XYZ
Ramo industrial	Lista de productos principales
Tipo de reporte	Anual 2002
Alcance	Unidades de negocio
Número de empleados	1,000
Internet	<a href="http://www.xyz.com">www.xyz.com</a>
Contacto	<a href="mailto:info@xyz.com">info@xyz.com</a>
Perfil económico	
Cantidad de producto vendido	1,000,000 kg
Ventas netas	10,000,000 USD
Perfil ambiental	
Energía consumida	100,000 gigajoules
Materiales consumidos	10,000 toneladas métricas
Agua consumida	50,000 m <sup>3</sup>
Emisiones de GHG	5,000 toneladas CO <sub>2</sub> equiv.
Emisiones de ODS	100 toneladas CFC11 equiv.
Índices de ecoeficiencia	
Masa de producto vendido por	
Consumo de materiales	100 kg por ton de material
Ventas netas por	
Consumo de materiales	1,000 USD por ton de material
Información metodológica	
ISO 14031	Información a solicitud

**Tabla 2.4.1** Ejemplo de Perfil de ecoeficiencia de una organización

El Libre Acceso a la Información es una parte vital dentro del marco de la ecoeficiencia ya que fundamenta el derecho de la sociedad civil a estar informado de las acciones que el Estado y las organizaciones privadas tienen sobre su entorno. La información es un elemento esencial en las sociedades democráticas ya que permite a los individuos y organizaciones establecer, comprender y cuestionar políticas y regulaciones que le afectan (MMSD, 2001). Al publicar la información, las instituciones admiten públicamente la afectación que tienen en el ecosistema y las acciones que se toman para disminuir el riesgo. Lamentablemente en México el acceso a la información es todavía muy restringido y no existen mecanismos implementados que puedan dar información a la sociedad civil de asuntos de interés general. A forma de referencia, se toma el caso de los Estados Unidos de América, en donde la Agencia de Protección Ambiental, actuando bajo la Ley de Planeación de Emergencias y Derecho a Saber de la Comunidad, también llamada Superfondo, exige a empresas de ciertos ramos industriales la realización de un inventario de emisiones tóxicas (Toxic Releases Inventory). Aunque en México la Semarnat requiere a las empresas reportes similares para el otorgamiento de la Licencia Ambiental Única, este tipo de información todavía no es disponible para el público en general. Una posibilidad es que a medida que se implemente la Ley de Acceso a la Información Pública aprobada en el 2003, el Estado se haga consciente sobre la necesidad de informar a la sociedad sobre el manejo de sustancias peligrosas en las comunidades y el riesgo que prevalece ante una exposición ya sea única o tipo crónica, a causa de empresas vecinas o con efectos a larga distancia. Por su parte, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que reúne a cerca de 30 países más desarrollados del mundo, incluyendo México, desde 1996 recomienda que las naciones miembros establezcan un sistema de registro de emisión y transferencia de contaminantes (MMSD, 2001).

### *2.5 Conceptos de mineralogía*

Los minerales se dividen en cuatro grupos principales: metales, minerales industriales, materiales de construcción y minerales energéticos. La obtención de los minerales generalmente son de dos tipos: minas a cielo abierto, y minas subterráneas (UNEP, 2000).

Una mina a cielo abierto es una excavación superficial que pretende extraer menas cerca de la superficie. La capa de roca que está sobre el mineral es removida y apartada de la mina para permitir la explotación de la mena. Actualmente es la principal forma de minería.

La minería subterránea ocurre para yacimientos profundos y es viable para menas de alta concentración, en la que un taladro perfora el yacimiento y permite el movimiento dentro de la tierra para explotar el mineral.

Una mena se define como una roca que puede ser aprovechada económicamente y ser utilizada como materia prima para la producción de metales (Rosenqvist, 1983). Se remarca el aspecto económico ya que es lo que hace la diferencia entre una roca común y una mena, y depende de la tecnología existente y el precio de mercado de dicho metal.

El beneficio de una mena se define como el procesamiento que regula el tamaño del producto, separa componentes no deseados y logra aumentar la calidad, pureza o grado de un producto deseado (EPA, 1995).

Molienda y cribado son dos operaciones básicas iniciales para la separación de fases en la mena. Tradicionalmente la molienda primaria se lleva a cabo en equipos ya sea giratorios, de mandíbula o de impacto (Rosenqvist, 1983). La del tipo secundario y terciario se realiza en equipos de cono o molinos de martillo. La última reducción se puede realizar en molinos de barra o de bola, dado un producto final con granos de 0.1 mm de diámetro. Esta etapa requiere una extensiva cantidad de energía mecánica, ya que por ejemplo una mena de cobre al 1% requerirá cerca de 2000 kWh por tonelada, que es casi la misma cantidad de energía que la que se gastará en las subsecuentes operaciones de fundido y refinado (Ibid).

La clasificación (“sorting” por su término en inglés) es el método más antiguo para concentrar los beneficios de la mena. Esta operación solía realizarse a mano, pero ha sido reemplazada por equipo tecnológico como fotoceldas o sensores que puestos sobre una banda transportadora del material, permite determinar si cumple o no con las propiedades que se buscan del material.

La separación por gravedad es un método también antiguo, el cual aprovecha la diferencia de densidades entre materiales para realizar la separación.

La flotación es un método de separación que aprovecha la mucha o poca afinidad de los materiales con el agua, y se realiza mediante inyección de aire. Los minerales afines al agua o hidrofílicos tenderán a hundirse en el cuerpo donde estén, mientras que los minerales

hidrofóbicos, o que tienen mayor energía interfacial sólido-agua, serán arrastrados por las burbujas de aire a la superficie.

La separación magnética se basa en la diferencia de propiedades magnéticas de los minerales. Su aplicación principal es en los minerales ferromagnéticos.

La lixiviación es un proceso de extracción de un compuesto metálico soluble mediante el uso de un solvente selectivo, como puede ser el agua, ácido clorhídrico o sulfúrico o una solución de cianuro. Posteriormente el metal se separa del lixiviado mediante algún proceso químico o electroquímico (EPA, 1995).

El lavado de gases es una operación importantes de limpieza de emisiones de operaciones de minería. Cuando se habla de polvo (“dust”) se refiere a partículas sólidas, como las de un horno de fundición, que son arrastradas junto con el gas. Las fumarolas o “smoke” son partículas sólidas como por ejemplo el ZnO o SiO<sub>2</sub>, mientras que la neblina o “fog” son gotas formadas por reacciones químicas o enfriamiento del gas, como el ácido sulfúrico originado del enfriamiento de gases de tostado. Algunos equipos de lavado de gases son ciclones, filtros, “scrubbers” y precipitadores electrostáticos o filtros Cottrell.

La calcinación es una operación empleada para remover agua, CO<sub>2</sub> o carbonatos, y su velocidad depende del calor necesario para descomposición. Típicamente se realiza en equipos como hornos de flecha, hornos rotatorios o lechos fluidizados, dependiendo la selección del equipo del tamaño y distribución de partícula.

El tostado es una operación típica para compuestos de metales sulfurados, dando como producto óxidos del metal y SO<sub>2</sub>. Su mayor aplicación ocurre en concentrados de cobre, plomo y zinc. Usualmente el tostado o “roasting” opera por debajo del punto de fusión de los sulfuros y óxidos involucrados (900 a 1000°C promedio), aunque debido a que la mayor velocidad de reacción ocurre entre 500 y 600°C, se tiene que considerar el rango de temperaturas entre 500 y 1000°C. El sinterizado es una operación similar al tostado, aunque se realiza cuando en vez de sulfuros se tienen sulfatos en la mena.

La reducción de óxidos de metal es otra operación común, utilizada cuando se busca comercializar el mineral en estado puro. Generalmente involucra la adición de carbón, el cual se descompone en CO, necesario para la reducción del metal y que origina como subproducto la emisión de CO<sub>2</sub>.

Las matas se conocen como sulfuros fundidos y mezclados de metales pesados, siendo la más conocida la de cobre. Una ventaja que ofrece la fundición de matas es que permiten en ocasiones la obtención directa del metal. Es decir, la reacción llevada a cabo es un tostado en vez de un tostado-reducción, lo que implica menor gasto de combustible (Rosenqvist, 1983). También es una ventaja que el punto de fusión disminuye, por ejemplo la mata de cobre-ferro funde a menos de 1000°C, mientras que aleaciones de los mismos metales requieren más de 1400°C.

La refinación es una operación que se lleva a cabo cuando se requieren metales de alta pureza, o bien cuando se busca un metal que está contenido en mínima concentración, pero que su valor amerita su recuperación. La refinación se basa en el principio de que los elementos se distribuyen de manera diferente en diferentes fases, y estas fases pueden ser separadas físicamente. Existen varios tipos de refinación; la refinación por fuego se lleva a cabo por la diferencia en afinidad con el oxígeno para cada metal, y se utiliza en procesos tales como del hierro, cobre o plomo. Otro tipo de refinación es la metal-metal, que básicamente implica el enfriamiento de la mezcla cerca del punto de fusión de la impureza, logrando producir un líquido que es separado. La fase sólida que en ocasiones flota se conoce como “dross” y usualmente son metales insolubles en forma elemental o como óxidos o sulfuros. Finalmente, la refinación por vacío es utilizada cuando alguna impureza tienen una presión de vapor que permita su destilación, como el caso de la remoción de zinc del plomo, o cuando el metal de interés es más volátil que las impurezas y puede gasificarse (como es la separación del zinc).

Hidrometalurgia es un término que abarca los procesos donde el aislamiento y beneficio de metales se realiza mediante el uso de agua o soluciones acuosas. Algunos procesos que pueden clasificarse dentro de la hidrometalurgia son el lixiviado de menas o de sulfuros tostados, hasta la purificación de soluciones como la refinación electrolítica.

La electrometalurgia merece mención aparte de los procesos pirometalúrgicos e implica operaciones como la refinación electrolítica para la obtención de metales de alta pureza.

## **Capítulo 3**

### **Metodología**

En este trabajo se utiliza fundamentalmente la teoría del Balance de Materiales para realizar los cálculos que permitan calcular los índices de ecoeficiencia de los procesos mineros. Dado que el trabajo se enfoca en la situación de la industria de México, los datos a utilizar serán aquellos reportados para el país durante los últimos años. Una vez seleccionados los minerales a desarrollar, se determinarán los índices de ecoeficiencia a calcular para los diferentes procesos. Finalmente, se investigó en diversas referencias bibliográficas cuáles son los procesos de producción más comunes para los minerales, buscando principalmente los reportes de materiales empleados y la cantidad. Donde fue posible obtener información, se enfocó la información a los procesos que se utilizan en México. Una vez reunida la información, fue necesario ajustar los diagramas para aquellos materiales cuya producción no se logra de manera primaria, sino que son productos adicionales a los de la mena principal.

#### *3.1 Selección de materiales*

De los datos reportados por la Secretaría de Economía sobre los principales productos minerales en México, mencionados en el Capítulo 1, se buscó el precio promedio que tienen en los mercados internacionales para compararlo con la producción nacional. Esta búsqueda coincide con los resultados reportados de valor de producción, en la que por ejemplo, el cobre es la principal fuente generadora de recursos, seguido de la plata y el zinc. Otros ejemplos de estos materiales son el oro y el plomo, y en menor cantidad el molibdeno, el bismuto y el cadmio.

También se buscó incluir aquellos minerales que si bien no constituyen parte primordial de los ingresos, debido a su volumen colocan a México en el escaparate internacional como un productor importante del mineral a nivel mundial. Algunos ejemplos de este tipo de minerales, afectados principalmente por su bajo costo, son la celestita, fluorita, barita, sal y grafito.

Finalmente se decidió incluir un mineral que aunque no es tradicionalmente considerado en el ramo minero, como es el cemento, debido a que la industria del cemento es muy

importante a nivel mundial y es una buena opción de comparación entre países, ya que existe prácticamente en casi todas las naciones y es un reflejo de la economía que prevalece en cada país. Un país que logra tener una industria fuerte de la construcción está apostando por inversión en infraestructura y en crecimiento de su economía.

### *3.2 Selección de Indicadores*

De acuerdo a la teoría de Indicadores de Ecoeficiencia comentada en el Capítulo 2, y en base a la información más comúnmente reportada, se escogieron algunos indicadores de ecoeficiencia tanto en valores absolutos, como relacionados al valor de la producción del mineral, que se obtiene de la multiplicación del precio promedio anual por la producción reportada al USGS. A continuación se enlistan los indicadores elegidos:

- Uso de materiales
- Dispersión de tóxicos (básicamente gases de efecto invernadero), limitados en este trabajo a emisiones de SO<sub>2</sub>.
- Contribución a cambio climático, limitados principalmente a emisiones de CO<sub>2</sub>.

Los anteriores indicadores fueron seleccionados debido a que son los que recomienda principalmente el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible. Estos indicadores son los más conocidos a nivel mundial ya que el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, a través de sus distintos protocolos internacionales y convenciones ha discutido mayormente. Estos indicadores fueron adaptados a los objetivos de este trabajo y en cada mineral se podrá revisar alguno de los indicadores mostrados en la Tabla 3.1.1

Los flujos a utilizar en el cálculo de indicadores se consideró como un promedio anual de la producción nacional durante los últimos cinco años reportados (la mayoría entre 1998 y 2002) por el USGS. Para aquellos minerales que se obtienen vía secundaria, dado que existen varias fuentes para poder obtenerlos y a fin de eliminar el posible “ruido” provocado por reciclaje del mismo mineral en vez de utilizar menas sin explotar, se procuró utilizar datos de concentraciones típicas reportadas, y los flujos se obtuvieron a partir de esa concentración en el flujo del metal principal. Posteriormente en la discusión de resultados se realizará la comparación entre datos de cálculos y el reporte real.

Los indicadores de producción de mineral por uso de materia prima o emisión de contaminantes se utilizan para conocer la relación existente entre la cantidad de producción

de un proceso y la cantidad, ya sea de materias primas empleadas o de emisión de gases, que son necesarios o consecuencia de un proceso productivo. Por ejemplo, el índice de ecoeficiencia de materiales de un metal precioso es notoriamente menor al de un mineral industrial (oro vs sal) ya que su concentración es menor en la naturaleza.

Indicador	Definición
Ecoeficiencia de materiales	Cantidad de mineral producido por cantidad de materias primas utilizadas (kg/kg)
Valor de producción por uso de materiales	Valor en dólares de la producción del proceso por cantidad de materias primas utilizadas (\$/kg)
Producción de mineral por emisiones de CO <sub>2</sub>	Cantidad de mineral producido por cantidad de emisiones producidas de CO <sub>2</sub> (kg/kg)
Valor de producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	Valor en dólares de la producción del proceso por cantidad de emisiones producidas de CO <sub>2</sub> (\$/kg)
Producción de mineral por emisiones de SO <sub>2</sub>	Cantidad de mineral producido por cantidad de emisiones producidas de SO <sub>2</sub> (kg/kg)
Valor de producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	Valor en dólares de la producción del proceso por cantidad de emisiones producidas de SO <sub>2</sub> (\$/kg)
<b>Tabla 3.1.1</b> Definición de indicadores utilizados	

Los indicadores de valor de producción de mineral por uso de materia prima o emisión de contaminantes permiten conocer cuál es la aportación económica del proceso al fabricante o país productor, en relación con la cantidad de materias primas o gases generados en el proceso. Si bien no es un indicador de rentabilidad del proceso, ya que para esto se requeriría conocer el costo de las materias primas empleadas, estos indicadores permiten conocer que, por ejemplo para una misma emisión de gases de efecto invernadero o de contribución al cambio climático, un mineral aporta un mayor flujo monetario que otro, por lo que para un mismo grado de contaminación, será más atractivo invertir en el mineral de mayor valor de producción.

### *3.3 Procesos*

Los procesos de la industria minera han permanecido con pocos cambios a lo largo de los últimos años y su grado de complejidad es muy variado, cambiando entre aquellos que son meramente procesos de flotación, hasta extensos diagramas que comprenden varias operaciones unitarias.

Para cada mineral se presenta un diagrama de flujo simplificado del proceso de producción, empezando desde el aprovechamiento en la mina hasta el grado más común de comercialización de dicho material. Hasta donde fue posible y la información publicada lo permitió, se incluyeron los materiales adicionales en cada unidad del proceso para lograr obtener un dato más fiel del uso de materiales en cada mineral. En base ya sea a datos de producción o consumo de materias primas, o también en función de las concentraciones típicas de un mineral en cierta etapa del proceso tal que permitiera calcular un flujo anual aproximado y por consiguiente los demás flujos secundarios.

Ahora bien, en principio se realizaron los cálculos por separado para cada uno de los minerales seleccionados, con el fin de obtener los indicadores de ecoeficiencia para cada producto. Sin embargo, se observó que en algunos de los minerales su extracción no proviene de la explotación específica de dicho material en la mina, proceso comúnmente conceptualizado como aprovechamiento primario, sino que por el contrario, son obtenidos como “subproductos” de otros materiales o por vía secundaria, pero que debido a su atractivo valor de comercialización también son vendidos, pudiendo llegar al caso de rebasar o dar mayor margen de ganancia que los otros minerales que originalmente eran el objetivo de la explotación de la mina. Para este tipo de casos es que los materiales son extraídos por vía secundaria, se reportó dentro de un mismo diagrama la totalidad de productos obtenidos, llegando a un indicador de ecoeficiencia de todo el proceso para varios minerales, y la contribución que cada uno tiene en esos indicadores, de manera que permite observar cuál material vuelve más rentable el proceso.

## Capítulo 4

### Desarrollo de Minerales y Resultados

#### 4.1 Barita

##### Historia

La barita (del griego *barys* que significa pesado) o sulfato de bario es un mineral que a principios del siglo pasado se utilizaba únicamente para acompañar al óxido de plomo al aplicar pintura blanca, reemplazándolo posteriormente debido a sus mejores propiedades para conservar el color. También se utilizaban compuestos de bario para fabricar papel y para aumentar el brillo de cristales. Sin embargo, a mediados de siglo el bario fue reemplazado por el dióxido de titanio como recubrimiento industrial, por lo que se buscaron otros campos donde fue aprovechable el bario, siendo su principal campo la industria de explotación de pozos de gas y petróleo.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de barita en el mundo es China con el 56% del total producido en el año 2000. En menor medida, otros importantes productores de barita son India, Marruecos, Estados Unidos, Irán, Turquía y México.

En México, el principal productor de este mineral es Barita de Sonora, perteneciente al Grupo Acerero del Norte, localizada la mina en Mazatán, Sonora.

La barita puede encontrarse como tal con impurezas de otros minerales como fierro, plomo, zinc o estroncio.

##### Propiedades

En la Tabla 4.1.1 se enlistan algunas propiedades importantes de la barita.

Peso molecular	233.42
Punto de fusión	1580 °C
Peso específico	4.2

**Tabla 4.1.1** Propiedades de la barita

La barita comercial puede ser de distintos colores tales como azul, negro, café, gris, etc dependiendo del contenido adicional de la mena.

## Usos

El uso de la barita se reduce casi exclusivamente a lo siguiente:

- Principalmente en la industria de exploración, descubrimiento, desarrollo y explotación de pozos petroleros para utilización en el taladro.
- Usos industriales como aditivo en el cemento, hule y espuma de poliuretano.
- En la industria automotriz es un protector de pintura metálica y componentes de pedales.

## Panorama económico actual

Los precios de la barita han tendido a la baja a finales del siglo pasado. Los precios de la barita van fuertemente ligados a los del petróleo debido a su dependencia, por lo que un precio castigado del petróleo resulta en el menor interés en la explotación de estos minerales, ya que por mencionar un ejemplo, en los Estados Unidos el 95% de su uso es en la industria del petróleo. En la Tabla 4.1.2 se observan los precios promedio entre 1997 y 2001 en dólares por kilogramo.

	1997	1998	1999	2000	2001
Precio	0.0224	0.0227	0.0256	0.0251	0.0250

**Tabla 4.1.2** Precio promedio de la barita, dólares por kilogramo (USGS, 2002)

## Situación mundial de México

En la Tabla 4.1.3 se reporta la producción nacional de barita durante el final del siglo pasado.

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	236,606	161,555	157,953	127,420	145,789

**Tabla 4.1.3** Producción de barita en México, en toneladas métricas (USGS, 2002)

## Investigación y Tecnología

No se reporta ninguna investigación significativa sobre posibles nuevos usos de la barita.

## Proceso de extracción y beneficio

La calidad de producto terminado de barita está especificada por el Instituto Americano del Petróleo (API) y la Asociación de Materiales de Compañías de Petróleo (OCMA), la cual exige que el 97% peso del material debe pasar por una malla 200-mesh (75  $\mu\text{m}$ ) y no más del 30% tengan menos de 6  $\mu\text{m}$  de diámetro efectivo. Su gravedad específica debe ser mayor a 4.2 y debe ser químicamente inerte con los taladros de exploración.

- La especificación internacional de la barita “grado vidrio” indica un 95% mínimo de  $\text{BaSO}_4$ , 1.5% máximo  $\text{SiO}_2$ , 0.15% máximo  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y 0.15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Si se desea como producto terminado el carbonato de bario ( $\text{BaCO}_3$ ), la especificación varía entre 92% y 96% mínimo de  $\text{BaCO}_3$  y máximo 1% de cada uno de las otras impurezas mencionadas para la barita (Metal Bulletin). Sin embargo, la especificación mexicana declara en general para la barita una pureza del 99%, con un máximo de 1% de contenido de estroncio.
- En la literatura de Denver se reporta que una mena típica de barita contiene un 88.8%  $\text{BaSO}_4$ , 9.2%  $\text{SiO}_2$ , 0.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 1.2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . En la flotación se utiliza un agente de aminas al 0.3 libras por tonelada de mena, logrando una eficiencia de recuperación del 85.5% de concentrado con barita al 94.6%.
- Una vez concentrada la barita se lleva a cabo la reacción, primero agregando carbono para producir sulfuro de bario y como emisión  $\text{CO}_2$ . Posteriormente se realiza la segunda reacción con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para producir como producto terminado el  $\text{BaCO}_3$ , generando como subproducto sulfuro de sodio.

## Impacto ambiental

Aunque la barita contiene un metal pesado como el bario, no está clasificado por la EPA como un químico tóxico bajo las regulaciones del “Superfondo” debido a su alta insolubilidad. No se reporta ningún impacto ambiental significativo por las operaciones de beneficio de la barita.

## Indicadores

En la Figura 4.1.1 se puede observar el diagrama de flujo desde el aprovechamiento de la mina de barita hasta la producción del principal mineral de bario en forma de carbonato.

En la Tabla 4.1.4 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del proceso de fabricación de carbonato de bario.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	48.70%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	\$11.77	\$/Mg
Producción de BaCO <sub>3</sub> por emisiones de CO <sub>2</sub>	2.65	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	\$64.07	\$/Mg
Producción de BaCO <sub>3</sub> por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	\$/Mg

**Tabla 4.1.4** Indicadores de ecoeficiencia de la barita

La barita comparte con la celestita algunas propiedades y tipos de proceso para su aprovechamiento, aunque tiene un mejor desempeño en cuanto al aprovechamiento del mineral por uso de materia prima o emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, su precio es en promedio 2 ó 3 veces inferior al de los minerales de estroncio, por lo que pierde atractivo su explotación al momento de hacer la comparación económica.

# Barita

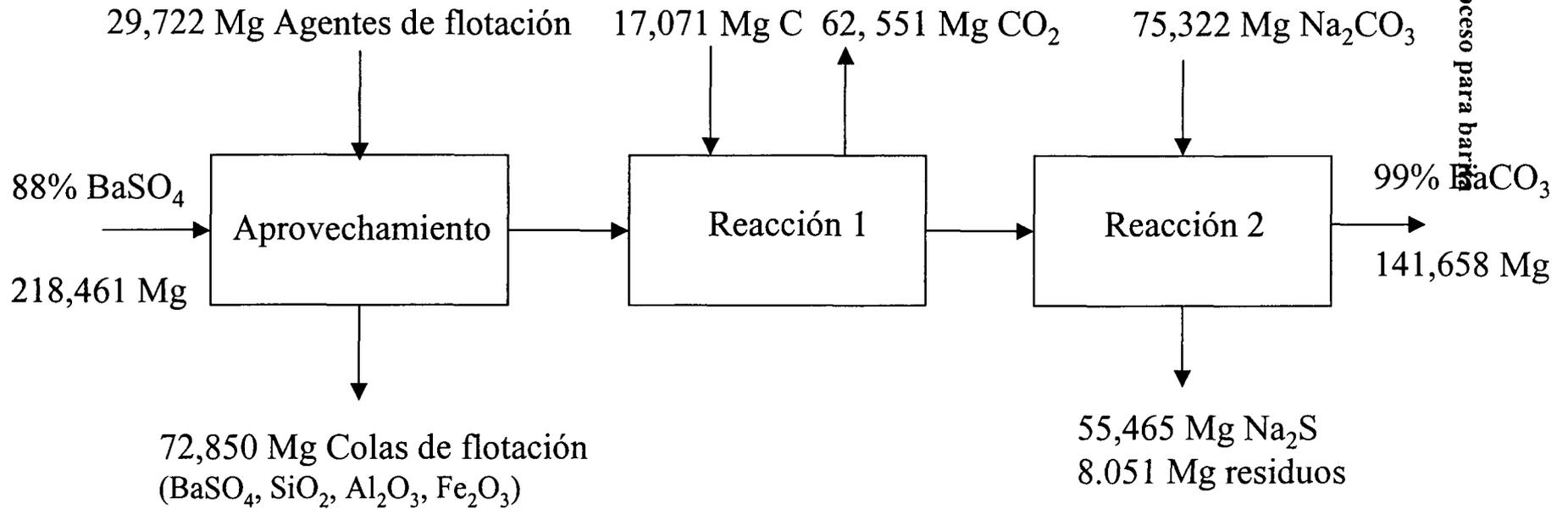


Figura 4.1.1 Diagrama de proceso para barita

## 4.2 Bismuto

### Historia

El bismuto era conocido en la Edad Media y su nombre proviene del alemán Wismut, aunque es incierta la etimología. El bismuto impuro era confundido con otros metales como arsénico, estaño y zinc. En 1739, Pott logró identificar el bismuto puro como un elemento.

### Localización y forma natural

El bismuto se encuentra en forma natural como sulfuro, llamado bismutina ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ) o de óxido llamado bismita ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), así como en estado elemental puro.

México es el segundo lugar mundial en la producción de este mineral, después de la República Popular de China. Otros importantes productores son Perú, Bolivia y Canadá.

Las principales compañías productoras de bismuto en México son Peñoles en Torreón, Minerales y Arcillas, con minas en San Pedro y Galeana, Coahuila, y Barita de Santa Rosa, en Múzquiz, Coahuila.

### Propiedades

En la Tabla 4.2.1 se enlistan algunas propiedades importantes del bismuto.

Número atómico	83
Peso atómico	208.980
Punto de ebullición	1436 °C
Punto de fusión	271 °C
Densidad @20 °C	9.78 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.2.1** Propiedades del bismuto

El bismuto es un metal cristalino, quebradizo, muy brillante y de color blanco con tonalidad ligeramente rosa. Solamente el mercurio tiene menor conductividad térmica que el bismuto entre los metales. Pueden prepararse alambres de bismuto, pero con el tiempo se tornan quebradizos. En la corteza terrestre su concentración se estima entre 0.17 y 0.2 ppm, siendo el elemento número 64 en abundancia.

## Usos

El bismuto tiene aplicaciones en lo siguiente (USGS, 2003):

- Su uso principal (42%) es en aplicaciones eléctricas como fusibles y soldadura, sustituyendo en lo posible al plomo.
- También es ampliamente empleado (37%) en productos farmacéuticos y químicos. Su uso más difundido es como medicamento en forma de salicilato, empleado para combatir la acidez estomacal y úlceras.
- En menor porcentaje se emplea como aditivo metalúrgico (19%) y varios (2%), ya que facilita operaciones de maquinado en el acero.

## Panorama económico actual

Se considera que es alentador el panorama para el bismuto debido a su creciente utilización como sustituto de compuestos con plomo a medida que crecen las restricciones ambientales por utilizar este último metal en USA y Europa Occidental. Sin embargo, debido a que es un subproducto en la refinación del plomo, su crecimiento es todavía dependiente de este metal, el cual se encuentra estancado. El bajo precio del bismuto y las reservas de China también contribuyen a castigar el mercado actual del bismuto, ya que tan pronto empieza a subir el precio del bismuto, aparece una sobreoferta del metal en el mercado y el precio disminuye nuevamente. En la Tabla 4.2.2 se reporta el precio promedio del bismuto en dólares por kilogramo, para el periodo 1998-2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	7.936	8.487	8.157	8.245	7.054

**Tabla 4.2.2** Precio promedio del bismuto, dólares por kilogramo (USGS, 2003)

## Situación mundial de México

La producción de bismuto proveniente de minas en México entre 1998 y 2002 se menciona en la Tabla 4.2.3. En la Tabla 4.2.4 se muestra la producción de refinerías en el país para el mismo periodo.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	1,204	548	1,112	1,390	1,200

**Tabla 4.2.3** Producción de bismuto de minas en México, toneladas métricas (USGS, 2003)

	1998	1999	2000	2001	2002
Primaria	1,030	412	1,083	1,390	1,200

**Tabla 4.2.4** Producción de refinerías de bismuto en México, ton. métricas (USGS, 2003)

#### Investigación y Tecnología

El óxido de bismuto se está empleando en Japón para la producción de cerámicos para electrónica, ya que mejoran las propiedades de los capacitores. En aplicaciones de fusibles y soldadura, los cables con aleación de bismuto contribuyen a facilitar la fabricación de cables más dúctiles.

También existe investigación en procesos de galvanizado que reducen la cantidad de zinc empleado, una mejor apariencia y menores ajustes de acabado del acero. En la industria de pigmentos, está reemplazando al plomo en las pinturas amarillas usadas para caminos, ya que mantiene las propiedades requeridas de color y reflectancia.

Un uso en desarrollo es como armamento para cuando se quiere evitar las balas de plomo, como puede ser en aviones o plantas tipo nuclear, químicas o biológicas. La ventaja que tienen las balas de bismuto sobre las de plomo es que, aunque conservan las propiedades balísticas así como la potencia letal, es que al chocar con cuerpos muy duros, como lo es el fuselaje de un avión o una barrera de concreto, se desintegran en polvo, por lo que es menor el riesgo de daño colateral en su uso en vuelos comerciales o fábricas (USGS, 2003).

#### Proceso de extracción y beneficio

Solamente en Bolivia se obtiene bismuto proveniente de una operación primaria (USGS, 2003), pero actualmente se encuentra detenida por no ser rentable a los precios actuales. En los demás países se aprovecha esencialmente como subproducto de la refinación de plomo a excepción de China, donde se obtiene del proceso del tungsteno.

- En la página [www.tms.org](http://www.tms.org) se encontró que una concentración típica para el plomo fundido que sale del horno contiene un 88.6% Pb y 0.48% Bi. Mientras tanto, datos de la refinería de Peñoles en Torreón indican que el bullion de plomo contiene 0.37% de bismuto y más de 97% de plomo.

- Existen dos procesos principales para el bismuto: Betterton-Kroll y Betts electrolítico. En este trabajo se tomará el primero para realizar los cálculos.
- El primer paso propuesto por Betterton-Kroll es el agregado de calcio y magnesio al plomo fundido para formar compuestos ternarios ( $\text{CaMg}_2\text{Bi}_2$ ), los cuales, cuando el plomo se enfría por arriba de su punto de fusión, flotan para formar una nata de Bi, Ca, Mg y Pb.
- Para determinar la cantidad de calcio y magnesio a utilizar, se puede utilizar la siguiente tabla en función de la cantidad de bismuto presente:

% de bismuto	kg Mg / kg Bi	kg Ca / kg Bi
0.05	3.50	1.06
0.09	2.05	0.62
0.18	1.06	0.36
0.20	0.60	0.25
0.68	0.39	0.15

**Tabla 4.2.5** Cantidad de Mg y Ca a utilizar en la desbismutización

- Dicha nata o “dross” se funde en horno agregando cloro o cloruro de plomo para remover en forma de cloruros al plomo, calcio y magnesio. La concentración reportada en esta nata es 6% Bi, 0.8% Ca, 1.3%Mg y el resto es Pb.
- Una vez que se agregó el  $\text{PbCl}_2$  y se logra la remoción del magnesio y calcio, se forma una aleación Pb-Bi con una concentración de bismuto entre 20% y 30%.
- Una mezcla de bismuto “crudo” realizada por investigadores chinos reporta una concentración de 93.35% Bi, 4.12% Pb, 1.63% Ag, 0.15% Cu, 0.03% Fe, 0.007% Zn y 0.0009% Au (Ding, 1994). Sin embargo, Habashi comenta que el bismuto crudo no tiene más de 0.5% y los datos anteriores no fueron congruentes con el resto de la información.
- Agregando aire y sosa cáustica se oxidan las impurezas restantes.

## Impacto ambiental

Debido a la presencia de remanentes de plomo, los residuos generados en la producción de bismuto pueden ser tóxicos por la presencia de ese metal. Sin embargo, debido a que es altamente insoluble, no es venenoso (Kirk-Othmer).

## Indicadores

En la Figura 4.2.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de bismuto a partir de la explotación del plomo

En la Tabla 4.2.6 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del bismuto.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.016%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	\$1.31	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	0.034	Mg/Mg
Valor de producción de bismuto por emisiones de CO <sub>2</sub>	\$278.15	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	0.012	Mg/Mg
Valor de producción de bismuto por emisiones de SO <sub>2</sub>	\$95.54	\$/Mg

**Tabla 4.2.6** Indicadores de ecoeficiencia del bismuto

El bismuto está en todos los indicadores por debajo de la décima posición, ya que por un lado su precio bajo aunado a una concentración típicamente baja no hace atractiva su explotación vía primaria, por lo que solamente se aprovecha por vía secundaria, en los procesos de extracción del plomo; debido a esto, se ve envuelto en un proceso con emisiones de gases de efecto invernadero y dispersión de tóxicos, por lo que también afecta su rendimiento en este tipo de indicadores de ecoeficiencia.

# Bismuto

Diagrama de proceso para bismuto

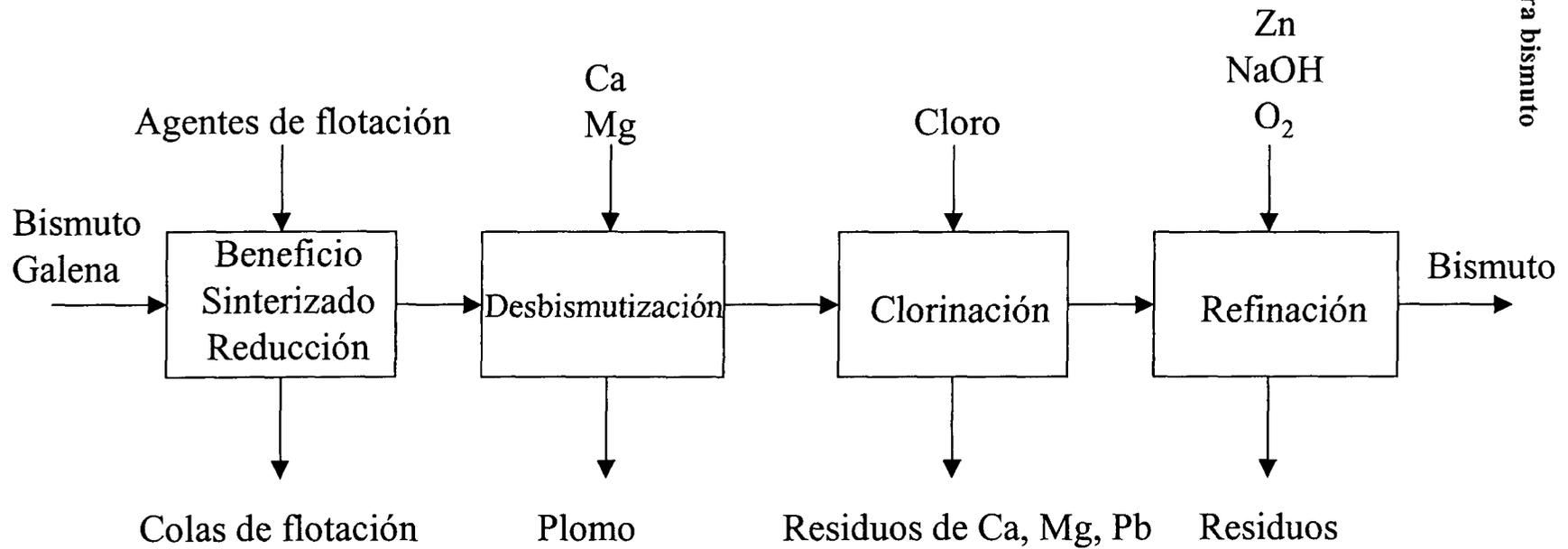


Figura 4.2.1 Diagrama de proceso para bismuto

### 4.3 Cadmio

#### Historia

La palabra cadmio proviene del latín *cadmia*, nombrado así por su ocurrencia en el mineral de zinc llamado calamina. Es un metal relativamente nuevo, ya que Strohmeyer lo descubrió en 1817, quien observó que algunas muestras de calamina cambiaban de color al calentarse, mientras que la calamina pura permanecía igual. Mediante reducción del carbonato de zinc logró extraer el metal y lo nombró como cadmio.

#### Localización y forma natural

El cadmio se encuentra siempre en compañía de otros minerales de interés, ya que no existen menas que sean exclusivamente de cadmio (Kirk-Othmer). En las menas está asociado con minerales de zinc como la esfalerita en forma de sulfuro, y permanece a lo largo del proceso de concentración del zinc. El mineral de cadmio más común es la greenockita o sulfuro de cadmio, CdS, que se distingue como unas manchas amarillas sobre la esfalerita. El mineral de cadmio es nombrado así en honor de la región de Greenock, Escocia, donde puede ser encontrado.

El principal productor mundial de cadmio en el mundo es China, seguido de Japón y Corea del Sur. México ocupó la cuarta posición en el 2002, seguido de Rusia.

Las principales compañías productoras de cadmio en México son aquellas que también producen zinc, Grupo México y Peñoles.

#### Propiedades

En la Tabla 4.3.1 se enlistan algunas propiedades importantes del cadmio.

Número atómico	48
Peso atómico	112.41 g/gmol
Punto de ebullición	767°C
Punto de fusión	320.9°C
Densidad @20 °C	8.64 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.3.1** Propiedades del cadmio

El cadmio es un metal blando, dúctil, color blanco argentino. Su abundancia en la naturaleza se estima en 0.5 ppm. Una característica que lo distingue del zinc es que es insoluble en hidróxidos alcalinos.

#### Usos

El cadmio tiene aplicaciones en lo siguiente:

- Su uso principal (75% del total) es en la fabricación de baterías de níquel-cadmio, empleadas para una variedad de artículos electrónicos y de comunicación.
- En menor cantidad se emplea en fabricación de pigmentos.
- Otros usos menores son recubrimientos, estabilizadores para plásticos y aleaciones no ferrosas.

#### Panorama económico actual

La utilización de cadmio permanece en duda debido a la creciente presión hecha a los fabricantes por las agencias ambientales sobre la restricción del uso de cadmio. Aunque el mercado de baterías de Ni-Cd es amplio debido al extendido uso de estos equipos (el USGS reporta que en promedio existen al menos 5 equipos electrónicos por casa que utilizan este tipo de baterías), existe desconfianza debido a que la Unión Europea ha amenazado con prohibir estas baterías para el 2008, situación que la tiene enfrentado con los Estados Unidos, ya que aunque USA también considera el cadmio como un elemento altamente tóxico, continua su producción. El reciclaje parece la mejor medida para salvar los metales de cadmio, pero es necesario invertir en el fomento a que los hogares reciclen estos componentes de electrónicos.

El precio promedio cotizado en Nueva York en los últimos años se menciona en la Tabla 4.3.2. Al ser un “commodity” subproducto, su precio usualmente es volátil (USGS, 2002).

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	0.617	0.308	0.352	0.330	0.661

**Tabla 4.3.2** Precio promedio del cadmio al 99.95% en NY, dólares por kg. (USGS, 2003)

## Situación mundial de México

En la Tabla 4.3.3 se muestra la producción de refinерías en el país para el periodo 1998-2002

	1998	1999	2000	2001	2002
Primaria	1,218	1,275	1,268	1,241	1,200

**Tabla 4.3.3** Producción de refinерías de cadmio en México, ton. métricas (USGS,2003)

## Investigación y Tecnología

No se encontraron posibles nuevos usos del cadmio en la industria y es claro que la tendencia es buscar la reducción en el uso de este metal.

## Proceso de extracción y beneficio

- La concentración de cadmio en menas de esfalerita es alrededor de 0.01% a 0.05%. Aún así, es de señalar que los cálculos realizados indicaron una concentración de la mena teórica de 0.023%, por lo que al compararse ambos datos se podría concluir que la calidad de la mena mexicana es menor al promedio reportado en literatura.
- Aunque algunos concentrados de zinc pueden tener un 1% de cadmio, por lo general este valor se sitúa entre 0.3% y 0.5% (Llewellyn, 1994).
- En Finlandia, el material que sale del tostado contiene de 0.19% a 0.24% cadmio. Cuando se extrae el sólido aprovechable, el 90% es Cd y el 10% Zn.
- La purificación más común es vía electrolítica. Se agrega aire a 80°C por 6 a 10 horas, se agrega ácido sulfúrico. El ánodo es de plomo, el ánodo de aluminio. Cada 12 horas debe ser limpiado, consumiendo esta operación 1250 kWh por tonelada de cadmio depositado.
- La especificación de producto más usual es cadmio al 99.99%

## Impacto ambiental

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos tiene incluido el cadmio como parte de los metales no ferrosos que originalmente fueron incluidos en el listado de contaminantes persistentes, bioacumulables y tóxicos, lo que implica que en aquel país debe reducirse su uso en un 50% para el año 2005. Esta lista ha sido revisada desde su

publicación en 1999, pero el cadmio continua estando presente junto con el plomo y mercurio. Existen presiones regulatorias, principalmente de la Unión Europea, tendientes a reducir o inclusive eliminar el uso de cadmio debido a su alta toxicidad (USGS, 2003).

El medio de transmisión de la toxicidad del cadmio no es vía contacto dérmico, sino principalmente por respiración o ingestión del metal. La exposición severa a polvos o exhalaciones puede causar daños irreversibles en los riñones, capacidad pulmonar y originar enfisema.

#### Indicadores

En la Figura 4.3.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de cadmio, el cual solamente se obtiene en los procesos de beneficio del zinc.

En la Tabla 4.3.4 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del cadmio.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.023%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	\$0.09	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	0.015	Mg/Mg
Valor de producción de cadmio por emisiones de CO <sub>2</sub>	\$6.16	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	0.005	Mg/Mg
Valor de producción de cadmio por emisiones de SO <sub>2</sub>	\$2.11	\$/Mg

**Tabla 4.3.4** Indicadores de ecoeficiencia del cadmio

El cadmio resultó casi en forma unánime el mineral con peor desempeño de ecoeficiencia, al tener los indicadores más bajos en casi todos los aspectos; debido a su baja concentración en los minerales de esfalerita, el índice de uso de materiales es menor, pero dada su alta toxicidad, no puede ser simplemente descartado en la explotación del zinc, por lo que se vuelve en un subproducto “obligatorio” del proceso, mientras que debido a que participa operaciones unitarias que emiten CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, tiene efectos en los indicadores de efecto invernadero y dispersión de tóxicos, en donde se refleja que la baja producción del metal en comparación de las emisiones y el precio poco atractivo del mismo. Es así que el cadmio constituye en términos general el mineral de peor desempeño en ecoeficiencia.

# Cadmio

Diagrama de proceso para cadmio

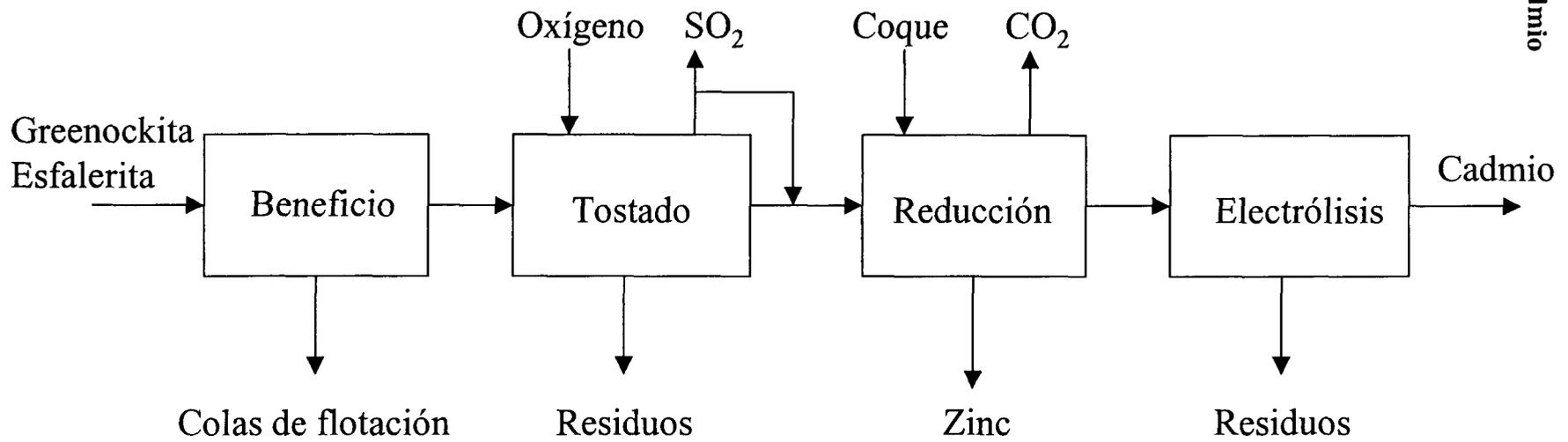


Figura 4.3.1 Diagrama de proceso para cadmio

#### 4.4 Celestita

##### Historia

Es la materia prima principal para la fabricación de artículos con estroncio. Este elemento fue descubierto por Crawford en 1790, ya que anteriormente era confundido con compuestos de bario. Dos años después, Hope confirmó la existencia del estroncio al descubrir la estroncianita o carbonato de estroncio. El nombre estroncio proviene de la localidad de Strontian, en Escocia. La celestita es un material que por mucho tiempo solamente se utilizó para usos menores en la pirotecnia para guerra (señales con luces) y diversión. No fue hasta 1969 que se encontró un uso práctico al estroncio al sustituir al bario como elemento componente en los cristales de televisores debido a que se descubrió que bloqueaban las emisiones de rayos x. Dos años después ya había entrado completamente al mercado de televisores y reemplazado al bario.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de celestita en el mundo es México, seguido de España y Turquía como únicos productores significativos del mineral. Cabe señalar que es uno de los pocos minerales en este trabajo en los que China, si bien ha tenido un aumento en su producción y surte las necesidades de los mercados asiáticos, no se considera una competencia fuerte debido a que las menas de estroncio no son de la calidad de los otros países mencionados. Finalmente, resulta curioso que el mayor productor mundial de minerales de estroncio no está en ninguno de los países mencionados, ya que es la canadiense Timminco la principal compañía en el ramo.

En nuestro país existen tres plantas de carbonato de estroncio: CPC, Compañía Minera La Valenciana y Solvay Química y Minera, lo que también hace de México el principal productor de carbonato de estroncio. Toda la celestita que se obtiene en México proviene de Coahuila (mina de san Agustín, en Torreón), y de esa entidad se envía a las plantas productoras de  $\text{SrCO}_4$  situadas en Reynosa, Durango y Monterrey. La capacidad de la planta de CPC en Reynosa es de 50,000 toneladas anuales de carbonato de estroncio, constituyéndose en el principal productor del país.

Algunos países han terminado la explotación de minas de celestita y prefieren importarla de los pocos países que todavía trabajan con celestita (en el año 2002 solamente seis países,

los tres mencionados arriba más Argentina, Irán y Paquistán reportaron operaciones de celestita). Argelia tiene un importante yacimiento de celestita, pero la crisis política y económica han impedido la entrada de inversión para poder utilizar sus recursos. Por ejemplo, en los Estados Unidos, no se explotan minerales de estroncio desde 1959 y solamente existe una fábrica de carbonato de estroncio.

El estroncio, elemento principal de valor de la celestita, es un material común en la naturaleza, promediando un 0.034% del total de las rocas ígneas según el USGS, aunque Kirk-Othmer reporta un 0.015%. Sin embargo, solamente dos compuestos de estroncio, la celestita y la estroncianita (carbonato de estroncio) tienen una concentración que haga redituable su explotación. La estroncianita es la que tiene un mayor valor comercial, pero no es tan común como la celestita.

#### Propiedades

En la Tabla 4.4.1 se enlistan algunas propiedades importantes de la celestita y estroncio.

Peso molecular de la celestita	183.7 g/gmol
Punto de ebullición del estroncio	1150 °C
Punto de fusión del estroncio	800 °C
Densidad @20 °C	3.96

**Tabla 4.4.1** Propiedades físicas del estroncio y/o celestita

La celestita tiene una tonalidad incolora o azul pálido. El estroncio pertenece a la familia del calcio o metales alcalinotérreos. Es un metal maleable y dúctil. Las sales de estroncio dan la flama brillante color carmesí, lo que ayuda tanto a su identificación cualitativa como para su utilización en pirotecnia.

#### Usos

Los principales usos del estroncio, producto principal de la celestita, son:

- El 77% de los compuestos de estroncio se utilizan para fabricar cristales de televisores. El estroncio es requerido por ley en las pantallas de tubos de rayos catódicos debido a que bloquean las emisiones de rayos x, por lo que en el vidrio del televisor se agrega carbonato de estroncio que al fundirse se torna óxido de estroncio.

- Magnetos de ferrita empleados en limpia parabrisas, bocinas, juguetes y otros artículos electrónicos.
- Juegos pirotécnicos, debido al color rojo intenso que emite producto del nitrato de estroncio presente.
- Producción electrolítica de zinc (remueve partículas de plomo presentes) y aplicaciones en pigmentos.

#### Panorama económico actual

Los precios de la celestita sufrieron una caída del 12.5% en el año 2000 comparado al año anterior y se han mantenido casi fijos desde entonces. México es el principal exportador de celestita para el mercado norteamericano. En la Tabla 4.4.2 se reportan los precios del mineral entre 1998 y 2002 en dólares por tonelada.

Se considera que seguirá existiendo mercado para la celestita en la medida en que los televisores y monitores de computadoras continúen utilizando tecnología de tubos de rayos catódicos. Sin embargo, algunas compañías están optando por utilizar monitores de pantalla plana que utilizan cristal líquido o plasma, que además de tener una mejor definición de imagen ocupan menos espacio. Pero el precio de estos productos es todavía alto a comparación de los monitores tradicionales, por lo que se vislumbra el uso de estroncio al menos durante los siguientes 10 años (USGS, 2003).

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	60	73	62	62	62

**Tabla 4.4.2** Precio promedio de la celestita, dólares por tonelada (USGS, 2003)

#### Situación mundial de México

En la Tabla 4.4.3 se reporta la producción nacional de celestita durante el periodo 1998 a 2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	118,230	164,682	157,420	145,789	140,000

**Tabla 4.4.3** Producción de celestita en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

## Investigación y Tecnología

Es relativamente poca o nula la investigación de compuestos de estroncio debido a que la mayoría de sus propiedades son similares al bario o calcio, pero debido a su menor presencia en la naturaleza, su costo es más elevado.

## Proceso de extracción y beneficio

- Los depósitos de celestita generalmente se encuentran en lugares remotos y de bajo desarrollo por su lejanía a las zonas más pobladas. El estroncio generalmente se encuentra acompañado de bario y calcio, elementos que también pertenecen a la familia de los alcalinotérreos, por lo que tienen propiedades químicas similares que dificultan su separación. De lo anterior, y dado que la remoción de estas impurezas es un proceso de uso intensivo de energía, es que los productores de químicos del estroncio requieren que las menas tengan un 90% de celestita como mínimo para su factibilidad económica (USGS, 2003), aunque Kirk-Othmer reporta trabajos en minas de celestita entre 84% y 92%. Una vez que se decide explotar un depósito de celestita, la selección de los concentrados puede ser manual y con algún tipo de lavado. Algunos pueden utilizar operaciones de separación por gravedad o flotación para un mayor beneficio de la mena.
- Aprovechando la diferencia de densidades entre la celestita y los sulfuros de otros metales (menor a  $3 \text{ g/cm}^3$ ) se busca concentrar la celestita en la mena y hacer rentable su explotación con un concentrado mínimo al 95% de sulfato de estroncio.
- Existen dos procesos principales de aprovechamiento de la celestita: el método de “black ash” y el de “soda ash”. En este caso se estudiará el primer método debido a que es el más común y es el que se emplea en la empresa “Chemical Products Corporation”, compañía propietaria de la planta productiva situada en Reynosa, Tamaulipas. Además, es considerado más eficiente para la producción del carbonato de estroncio, y los procesos de investigación tecnológica se están enfocando para este tipo de proceso.
- El primer paso del método “black ash” consiste en revolver una mezcla de celestita y carbón molida y filtrada a un tamaño propuesto de partícula. La mezcla se calienta a una temperatura de  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , emitiendo  $\text{CO}_2$  proveniente del sulfato de estroncio

insoluble, por lo que se forma un sulfuro de estroncio soluble, el cual es disuelto en agua para ser filtrado posteriormente.

- La siguiente etapa consiste en agregar ya sea  $\text{CO}_2$  ó  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para formar un precipitado de carbonato de estroncio. Estos sólidos son filtrados, secados y empacados para su comercialización final. La especificación reportada por Industrial Minerals Handy Book requiere una concentración mínima de 98% de  $\text{SrCO}_3$ , 1.3% máximo  $\text{CaCO}_3$  y 1.4% máximo  $\text{BaCO}_3$ .

#### Impacto ambiental

No se reporta algún impacto ambiental significativo derivado de la explotación y fabricación de minerales de estroncio.

#### Indicadores

En la Figura 4.4.1 se puede observar el diagrama de flujo desde el aprovechamiento de la mina de celestita hasta la producción del principal mineral de estroncio en forma de carbonato.

En la Tabla 4.4.4 se reportan los índices de ecoeficiencia del proceso de fabricación de carbonato de estroncio, el cual es el producto terminado del proceso de celestita.

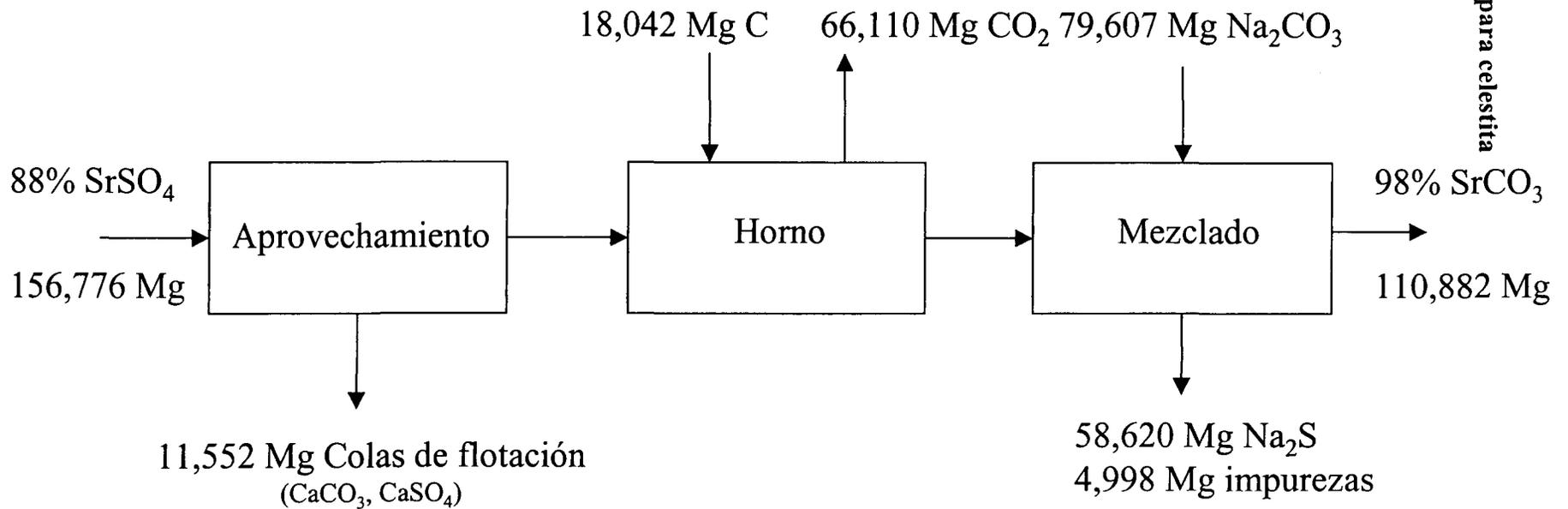
Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales de $\text{SrCO}_3$	43.58%	Mg/Mg
Valor de producción de $\text{SrCO}_3$ por uso de materiales	\$36.42	\$/Mg
Producción de $\text{SrCO}_3$ por emisiones de $\text{CO}_2$	1.68	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de $\text{CO}_2$	\$140.15	\$/Mg
Producción de $\text{SrCO}_3$ por emisiones de $\text{SO}_2$	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de $\text{SO}_2$	--	\$/Mg

**Tabla 4.4.4** Indicadores de ecoeficiencia de la celestita

La celestita tiene en sus indicadores de materiales un desempeño inferior al de la barita, mineral con el que comparte algunas similitudes en su proceso y familia, pero superior en los indicadores que incorporan el factor económico debido al precio más atractivo de la celestita y la mayor producción nacional.

# Celestita

Diagrama de proceso para celestita



• Proceso “Black Ash”

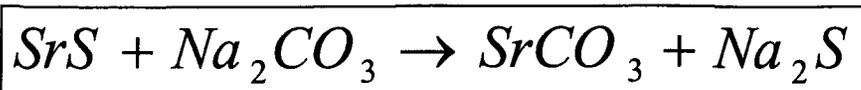
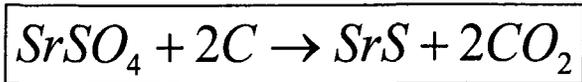


Figura 4.4.1 Diagrama de proceso para celestita

## 4.5 Cemento

### Historia

El cemento forma parte de un grupo de minerales denominados industriales que, aunque no son tan reconocidos como los metales preciosos, su volumen los convierte en vitales para muchas economías mundiales, además de que se considera que el ramo de la construcción, del que el cemento es parte importante, es un reflejo del estado de la economía y el crecimiento o estancamiento que tenga el país.

La palabra cemento se deriva del Latín *caementum* o piedra dura. La producción de cemento data de tiempos antiguos; los Romanos son considerados los primeros usuarios al fabricar cemento de una mezcla de óxido de calcio y ciertas cenizas volcánicas. Sin embargo, una vez que cayó el Imperio Romano decayó el interés en este mineral hasta mediados del siglo XVIII, cuando nuevas mezclas de cemento, esta vez con  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ , arcilla y residuos de fundición, fueron desarrolladas. El inventor al que se le adjudica el desarrollo del cemento moderno es Joseph Aspdin, quien en 1824 patentó un proceso para la fabricación de cemento a partir de una mezcla de  $\text{CaCO}_3$  y arcilla quemados a alta temperatura. Aspdin nombró al material como “cemento Portland” debido a que le recordaba a un edificio local cuyas piedras se originaban en la isla de Portland, al sur de Inglaterra. La calidad de este cemento fue reconocida superior a las demás existentes, por lo que rápidamente se hizo popular y fue llevado a Francia y Alemania (van Oss, 2002)

### Localización y forma natural

El mayor productor de cemento en el mundo es China, con amplio margen sobre los demás países. Le siguen en orden India, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur. México ocupó el sitio 12 en el año 2002. Sin embargo, el mercado chino está segmentado en muchos pequeños productores locales, por lo que ninguna figura a nivel mundial. La empresa cementera más grande del mundo es la compañía francesa Lafarge, seguida de la transnacional suiza Holcim, y en tercer lugar la empresa mexicana Cemex.

En México, Cementos Mexicanos es el principal fabricante de cemento en el país con oficinas corporativas en Monterrey, y tercero a nivel mundial. Otros fabricantes son Apasco, propiedad de Holcim (antes Holderbank) y Cooperativa Cruz Azul, en el estado de Hidalgo. Anteriormente existían más empresas, pero en los últimos años ha habido una

serie de adquisiciones de las compañías más grande y han integrado el otrora mercado segmentado por regiones.

El cemento es un término genérico que abarca muchas combinaciones de materias primas tal que resultan en un producto con características diferentes según lo que se requiera, pero básicamente se compone de una mezcla de rocas calizas con silicatos.

### Propiedades

Debido a la diversidad en tipos de cemento, es difícil reportar propiedades específicas de alguno. El cemento es típicamente un mineral color gris debido a la presencia de fierro, aunque por ejemplo también existe el cemento blanco, el cual es eliminado de la presencia del metal y por consiguiente toma un color claro.

### Usos

El cemento se utiliza en la industria de la construcción y su tipo de mercado se puede dividir de la siguiente manera (USGS, 2003):

- Productores de concreto mezclado (75%)
- Fabricantes de productos de concreto (13%)
- Contratistas, para el pavimentado de caminos (6%)
- El resto en distribuidores de materiales de construcción y varios.

### Panorama económico actual

La situación mundial del cemento es relativamente mejor que el resto de la economía global, incluyendo las compañías de metales. Las bajas tasas de interés y el mantenimiento de inversiones en la construcción han mitigado las pérdidas. En los últimos años han sucedido una serie de fusiones y adquisiciones entre compañías cementeras que han buscado consolidar a las compañías más grandes, incluyendo Cemex.

Dado que las reservas de las materias primas para producir cemento son grandes, la preocupación gira entorno a la disponibilidad de combustibles a precio accesible por una parte, y las presiones ambientales por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En cuanto a los combustibles para los hornos cementeros, la tendencia es a la utilización cada vez mayor de residuos sólidos y líquidos con alto contenido energético, aparte de

ofrecer una disposición final a residuos que hubieran sido confinados o simplemente desperdiciados. A medida que disminuyan los trámites administrativos para realizar la recolección de estos residuos y los precios se equiparen al costo de los combustibles, podrá aumentar el uso de los combustibles alternos (USGS, 2003). Los precios del cemento tipo Pórtland se ven afectados por la creciente demanda del cemento pozolánico, el cual ha crecido debido a sus menores requerimientos energéticos de producción (Ibidem).

En la Tabla 4.5.1 se puede observar el precio promedio del cemento entre 1998 y 2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	76.46	78.27	78.56	75.50	77.00

**Tabla 4.5.1** Precio promedio internacional del cemento, dólares por tonelada (USGS, 2003)

#### Situación mundial de México

La producción de cemento durante el periodo 1998 a 2002 se muestra en la Tabla 4.5.2

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	27,744	29,413	31,677	29,966	30,000

**Tabla 4.5.2** Producción de cemento en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

#### Investigación y Tecnología

La investigación sobre cemento no radica tanto en nuevos usos del material, sino en la reingeniería de procesos y la forma de disminuir el impacto ambiental propio de la industria, así como incrementar la eficiencia de producción mediante un menor uso de combustibles. El abandono de la tecnología de base húmeda por la vía seca es el reflejo del cambio hacia una industria más eficiente.

#### Proceso de extracción y beneficio

Aunque el proceso de fabricación de cemento es muy complejo, se puede dividir en tres bloques principales. Cabe mencionar que existen dos tipos principales de proceso, ya sea por base húmeda o por base seca. La tecnología de base seca es más moderna y en México únicamente se utiliza esta vía de producción, señalando que entre sus ventajas cuenta con un menor consumo de energía que la base húmeda:

- Beneficio: La extracción de los minerales que son materia prima del clinker abarcan generalmente cuatro tipos básicos piedras: calizas, silíceas, aluminosas y ferrosas. Como regla heurística y que es corroborada por datos reportados por los productores de cemento, se considera que se necesitan 1.7 toneladas de materia prima para fabricar 1 tonelada de clinker (Van Oss, 2003).
- Además de utilizarse en México solamente el proceso vía seca, específicamente se emplean sistemas con precalentador o precalcinador, por lo que se tomarán estas guías para los cálculos de emisiones.
- En base al consumo de materias primas reportado por Van Oss, se obtiene que la composición promedio original para producir cemento es 87% calizas, 5.7% arcillas, 6.3% aluminosas y 1% ferrosas, según el promedio de los pasados 5 años.
- El clinker se compone químicamente de cuatro materias primas principales aproximadamente a las siguientes concentraciones: CaO al 65%, SiO<sub>2</sub> al 22%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al 6% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al 3%, siendo el resto otros óxidos (Ibidem).
- El clinker formado se enfría y pasa al cribado para convertirse en cemento, el cual se compone de silicato de tricalcio o alita (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>) a un rango 50% a 55%, silicato de dicalcio o belita (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) entre 19% y 24%, aluminato de tricalcio (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) del 6% al 10% y aluminoferrita de tetracalcio (Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>) 7%-11% (Ibidem).
- Usualmente al final el clinker es tratado con un 5% de yeso para su conversión a cemento Pórtland.
- Finalmente el cemento es empacado y almacenado para su entrega final al cliente.

### Impacto ambiental

El cemento, a diferencia de la explotación de la mayoría de los metales preciosos o minerales no ferrosos, tiene un impacto en el ecosistema a un nivel global en vez de limitarse al espacio en donde se produce. Si bien sí existen contaminantes y afectación del entorno ecológico cuando se explota este mineral, basta observar en ciudades como Monterrey las explosiones realizadas en cerros para obtención de materia prima, se considera que el cemento impacto en forma global debido a que en su elaboración se consume una gran cantidad de energía que requiere de inyección de combustible, el cual al

quemarse produce como emisiones gases asociados con el efecto invernadero y calentamiento global, el dióxido de carbono.

#### Indicadores

En la Figura 4.5.1 se puede observar el diagrama de flujo simplificado para la producción de cemento.

En la Tabla 4.5.3 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del cemento.

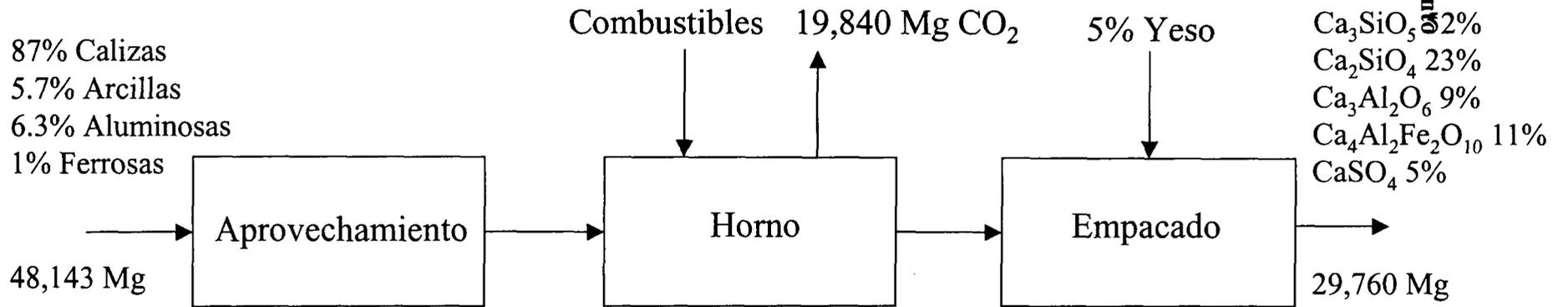
Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	60.00%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	\$46.41	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	1.50	Mg/Mg
Valor de producción de cemento por emisiones de CO <sub>2</sub>	\$116.04	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción de cemento por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	\$/Mg

**Tabla 4.5.3** Indicadores de ecoeficiencia del cemento

El cemento tiene un desempeño alto en comparación de otros minerales en los indicadores de ecoeficiencia de materiales, dado que es una concentración no tan rigurosa de minerales comunes en la superficie, y en el indicador de dispersión de tóxicos, ya que no hay reportes de emisiones significativas para los procesos utilizados en México. En los indicadores de gases de efecto invernadero, efectivamente se puede observar que la industria del cemento es un participante importante y su desempeño es bajo, ya que por ejemplo en el indicador de flujo económico por emisión de CO<sub>2</sub>, todos los metales, con excepción del cadmio, superan ampliamente al cemento, debido principalmente a la diferencia en los precios internacionales.

# Cemento

Diagrama de proceso para cemento



- Proceso base seca con precalentador



Figura 4.5.1 Diagrama de proceso para cemento

## 4.6 Cobre

### Historia

El cobre es uno de los minerales que por más tiempo ha aprovechado el hombre a lo largo de la Historia. La palabra proviene del griego *kyprios*, en referencia a Chipre, lugar donde antiguas civilizaciones explotaban el mineral. Existe evidencia que los habitantes de Medio Oriente lo utilizaron por el año 7000 a.C., y ciertamente los egipcios y babilonios realizaron diversos artículos en el año 4000 a.C., lo que daría inicio a la llamada Era del bronce. También es posible encontrar rastros de uso de bronce en la cultura de los sumerios en 3500 a.C. y nuevamente los egipcios en 2500 a.C. La Revolución Industrial traería el mayor incremento en la utilización de cobre y a medida que avanzó la industria eléctrica este metal fue volviéndose más indispensable.

### Localización y forma natural

Existen yacimientos de cobre en muchos lugares del mundo, pero se pueden encontrar los principales depósitos en las regiones montañosas occidentales de América (Norte y Sur), África del Sur y los Montes Urales en la antigua URSS. A nivel mundial los principales productores son Chile, USA, Indonesia, Australia y Perú.

En México los mayores yacimientos se encuentran en Sonora (minas de La Caridad y Cananea, de Grupo México), Zacatecas (mina de San Martín) y en San Luis Potosí (Industrial Minera, de Grupo México). En 1998 se terminó un nuevo convertidor en el horno de La Caridad (Sonora, de Grupo México) incrementó la capacidad de la planta de 180,000 toneladas a 280,000 toneladas anuales. El productor principal nacional es Grupo México con el 87.5% de la producción nacional en el año 2000. Otro productor es Peñoles, quienes están aliados con el líder chileno Codelco en un proyecto en Sonora. Cabe señalar que Grupo México ha incursionado en mercados extranjeros y tiene operaciones tanto en Estados Unidos como en Sudamérica. La compañía ASARCO tiene varias minas en Arizona, Texas, Montana, etc. Sin embargo, han disminuido sus operaciones e incluso cerrado debido a los altos costos energéticos que se han presentado, por lo que solamente se están enfocando a minas consideradas por el grupo de mayor concentración de cobre. De hecho, en el año 2002, ASARCO estuvo inmersa en falta de liquidez y altos costos de remediación de sitios por restricciones ambientales, lo que ha afectado a la compañía al

grado de ser intervenida por el Departamento de Justicia de los Estados Unidos (USGS, 2003).

El cobre puede ser encontrado en la naturaleza bajo diferentes formas, siendo las más comunes como compuestos sulfurados, y se puede hallar como  $\text{Cu}_2\text{S}$  o calcocita, calcopirita ( $\text{CuFeS}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y como óxidos en el óxido de cobre (I),  $\text{Cu}_2\text{O}$  o cuprita, malaquita ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ ) y azurita ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ )

### Propiedades

En la Tabla 4.6.1 se enlistan algunas propiedades importantes del cobre.

Número atómico	29
Peso atómico	63.546
Punto de ebullición	2582 °C
Punto de fusión	1084.5 °C
Densidad @20 °C	8.95 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.6.1** Propiedades del cobre

El cobre puro es de color rosa rojizo que a altas temperaturas de fundición emite luz verde. Es un metal maleable y dúctil, así como un buen conductor de calor y electricidad. Forma compuestos fácilmente con el cloro, bromo, yodo, oxígeno y azufre. Se disuelve en ácido nítrico para formar compuestos de cobre. Su estado oxidado más común es cobre (II),  $\text{Cu}^{2+}$ .

### Usos

El cobre es utilizado en diversas industrias tales como (USGS, 2003):

- Construcción (44%)
- Artículos eléctricos y electrónicos (25%)
- Equipo de transporte (11%)
- Maquinaria industrial y productos generales (20%)

### Panorama económico actual

La producción mundial de cobre, que había venido aumentando consecutivamente desde 1995, en el año 2003 tuvo un decremento debido a recortes por parte de los productores de

Estados Unidos y Sudamérica. Por primera vez en varios años existe una sobreoferta de cobre y una disminución en el consumo del metal. Se estima que las reservas mundiales están en el orden de 1.6 miles de millones de toneladas de cobre en tierra y 700 millones de toneladas bajo el mar. El precio del cobre del índice London Metal Exchange entre 1998 y 2002 se menciona en la Tabla 4.6.2.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	1.653	1.571	1.812	1.578	1.541

**Tabla 4.6.2** Precio del cobre alto grado en el London Metal Exchange, dólares por kg (USGS, 2003)

#### Situación mundial de México

La producción minera de cobre en México entre 1997 y 2001 se menciona en la Tabla 4.6.3. En la Tabla 4.6.4 se muestra la producción de hornos de fundición de cobre. En la Tabla 4.6.5 se detalla la producción por fuente primaria y secundaria (estimado) de cobre refinado en México para el mismo periodo. Se puede observar que en México la principal fuente de obtención de cobre es por la vía primaria o aprovechamiento directo.

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	390,536	384,641	381,184	364,566	367,379

**Tabla 4.6.3** Producción de minas de cobre en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	348,290	378,302	352,700	323,000	310,000

**Tabla 4.6.4** Producción de hornos de fundición en México, ton. métricas (USGS, 2003)

	1997	1998	1999	2000	2001
Primaria	282,217	432,000	411,952	388,200	400,600
Secundaria	14,783	15,000	14,000	15,000	15,000
Totales	297,000	447,000	425,952	411,000	415,600

**Tabla 4.6.5** Producción de cobre refinado en México, en toneladas métricas. (USGS, 2003)

## Investigación y Tecnología

Actualmente los científicos trabajan en el desarrollo del cobre como una alternativa del aluminio debido a la menor conductividad de este último dificulta su uso en aparatos más pequeños. Sin embargo, no es posible sustituirlo directamente debido a que el principal semiconductor, el silicio, es atacado por la difusión atómica del cobre, por lo que investigadores de la empresa IBM han trabajado en la colocación de una cubierta aislante entre el cobre y el silicio. Se piensa que los nuevos chips de cobre tengan velocidades cuatro veces superiores a los de aluminio aunado a un menor costo de fabricación.

## Proceso de extracción y beneficio

- La información siguiente fue tomada del libro de Biswas.
- Casi el 90% del cobre producido mundialmente proviene de menas sulfuradas, las cuales dado que no pueden ser tratadas fácilmente por métodos hidrometalúrgicos (lixiviación), son necesariamente expuestas a técnicas pirometalúrgicas.
- Debido a la baja concentración que se encuentra el cobre en las menas sulfuradas (menor a 1%) no es costoso la fundición directa del material debido al alto costo energético y el tamaño necesario del horno de fundición, por lo que es necesario extraer un concentrado de la mena previo a su tratamiento térmico. Las minas a cielo abierto contienen una concentración de 0.5% en promedio, mientras que las minas subterráneas fluctúan en el rango de 1% a 2% de cobre (Biswas, 1993).
- El beneficio de las menas de cobre consiste básicamente de dos etapas principales: la disminución de tamaño o pulverización de la mena hasta lograr un tamaño de mineral muy fino (alrededor de 100  $\mu\text{m}$ ), y una posterior separación física de las partículas de mineral por flotación sobre espuma para lograr un concentrado aproximado del 25% de cobre.
- El proceso de flotación sobre espuma se rige bajo los siguientes principios: los minerales sulfurados pueden tornarse hidrofóbicos mediante el agregado de ciertos reactivos llamados colectores que son moléculas con un extremo polar y uno no polar, lo cual puede ser logrado dentro de una pulpa agua-mena. Al tener contacto con burbujas de aire, éstas tenderán a pegarse con los minerales hidrofóbicos y la consiguiente separación de las partículas de mineral que sean afines al agua. De lo

anterior, al momento de realizar el beneficio mediante flotación, se busca acondicionar la pulpa de la mena para que los minerales de cobre se vuelvan hidrofóbicos sin afectar los otros minerales, a la vez que se expone el flujo a una corriente dispersa de burbujas de aire a través de la pulpa.

- Una vez que se logra el concentrado de cobre de la flotación, se busca eliminar el contenido de agua, lo cual es logrado mediante asentamiento en espesadores de gran tamaño que pueden o no utilizar agentes floculantes para acelerar la separación deseada. El líquido de la pulpa de flotación a menudo se recicla dentro de la molienda. Los sólidos que se obtienen de los espesadores todavía contienen cerca de 30% de agua, por lo que todavía son hechos pasar por filtros de vacío rotatorios y obtener un producto con concentración cercana al 10% peso de agua. Este concentrado es el que finalmente se transporta a la fundidora.

#### Proceso de Tostado

- La tostación del cobre es una oxidación parcial de los concentrados de sulfuro de cobre con aire, la cual se lleva a cabo a una temperatura entre 500 y 700 °C. Un subproducto de esta operación es la emisión de SO<sub>2</sub> a una concentración entre 5 y 15%, el cual se procura recuperar como H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### Proceso de fundición de mata

- Es un método importante para la extracción de cobre a partir de menas sulfuradas, ya que tiene un gasto de energía relativamente bajo y una velocidad de producción alta. Su principal desventaja es la emisión de SO<sub>2</sub>.
- Esta operación consiste en la fusión a 1200 °C de los concentrados parcialmente tostados tal que produzca dos fases líquidas separables, una rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxidos). Típicamente la fase rica en cobre puede variar en concentración entre un 35 y 65% de cobre, mientras que la escoria no debe contener más del 1%.
- Inicialmente los hornos de fundición eran del tipo alto horno y no era tan necesario realizar el beneficio por flotación en la mina. A medida que fueron escaseando las menas sulfuradas ricas en cobre, se hizo necesario utilizar la flotación por espuma, lo que originó concentrados finos que no eran posible operar en altos hornos, por lo

que se optó por los hornos de reverbero. La tecnología evolucionó y se llegó al horno eléctrico y a la fundición tipo “flash” o instantánea.

#### Proceso de refinación electrolítica

- La electrorrefinación consiste en la disolución electroquímica del cobre de los ánodos impuros y el depósito selectivo de este cobre disuelto en forma pura sobre cátodos de cobre. Sus objetivos principales son la remoción de impurezas valiosas, y la eliminación de impurezas que dañan las propiedades mecánicas y eléctricas del metal, tal que llegue a una pureza de cobre mayor a 99.9%. En una operación de electrorrefinación del cobre se busca optimizar tres factores: la pureza del cátodo, la producción lograda, y el consumo de energía por tonelada de cátodo. Las variables más importantes a controlar son la calidad del ánodo (uniformidad en la forma y peso), las condiciones del electrolito (pureza, temperatura, velocidad de circulación) y la densidad de corriente del cátodo. El control de calidad del cobre refinado se basa fundamentalmente en la apariencia, la conductividad eléctrica, y el desempeño físico durante la fabricación y uso, tal que permita predecir su buen desempeño en el uso final.

#### Impacto ambiental

El principal problema ambiental de la producción de cobre es la emisión de  $\text{SO}_2$ . Actualmente está prohibida su descarga directa a la atmósfera, y entre las normas ambientales más comunes se encuentra que no se debe arrojar a la atmósfera más del 10% del azufre que entra a la fundidora, el contenido anual promedio en cualquier parte del mundo no debe exceder 0.03 ppm volumen, ni las 0.14 ppm en cualquier parte en cualquier día. Un problema recurrente es que no se sabe qué hacer con el azufre recuperado, ya que es mayor al que puede ser usado con fines industriales o agrícolas. Cabe señalar que las técnicas hidrometalúrgicas evitan la emisión de dióxido de azufre, sin embargo, el azufre entra a las soluciones de lixiviación como sulfato y se corre el riesgo de contaminar el agua. Es importante mencionar que se han encaminado grandes esfuerzos para evitar la descarga de aguas de proceso con concentraciones mayores a 0.1 ppm de metales propios de las menas sulfuradas, como cobre, arsénico, cadmio, plomo y zinc. En la medida en que estos

circuitos de agua sean cerrados, se pueden disminuir los riesgos de contaminación de aguas para usos no industriales.

### Indicadores

En la Figura 4.6.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de cobre desde las minas hasta la refinación electrolítica

En la Tabla 4.6.6 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del cobre.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.49%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	\$8.02	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción de cobre por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	1.98	Mg/Mg
Valor de producción de cobre por emisiones de SO <sub>2</sub>	\$3,235.62	\$/Mg

**Tabla 4.6.6** Indicadores de ecoeficiencia del cobre

El cobre es un metal que se encuentra en la parte media-baja de la tabla comparativa con los demás minerales en los indicadores de uso de materiales y dispersión de tóxicos. No se reportan emisiones significativas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La combinación del flujo de producto terminado y el precio internacional del cobre lo hacen ser el mineral de mejor desempeño dentro de los que participan en el indicador de flujo económico por emisión de SO<sub>2</sub>, superando al plomo, que aunque tiene mejor desempeño en el indicador de emisiones de SO<sub>2</sub>, su precio no es tan atractivo como el cobre.

# Cobre

Diagrama de proceso para cobre

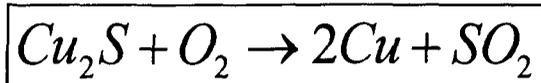
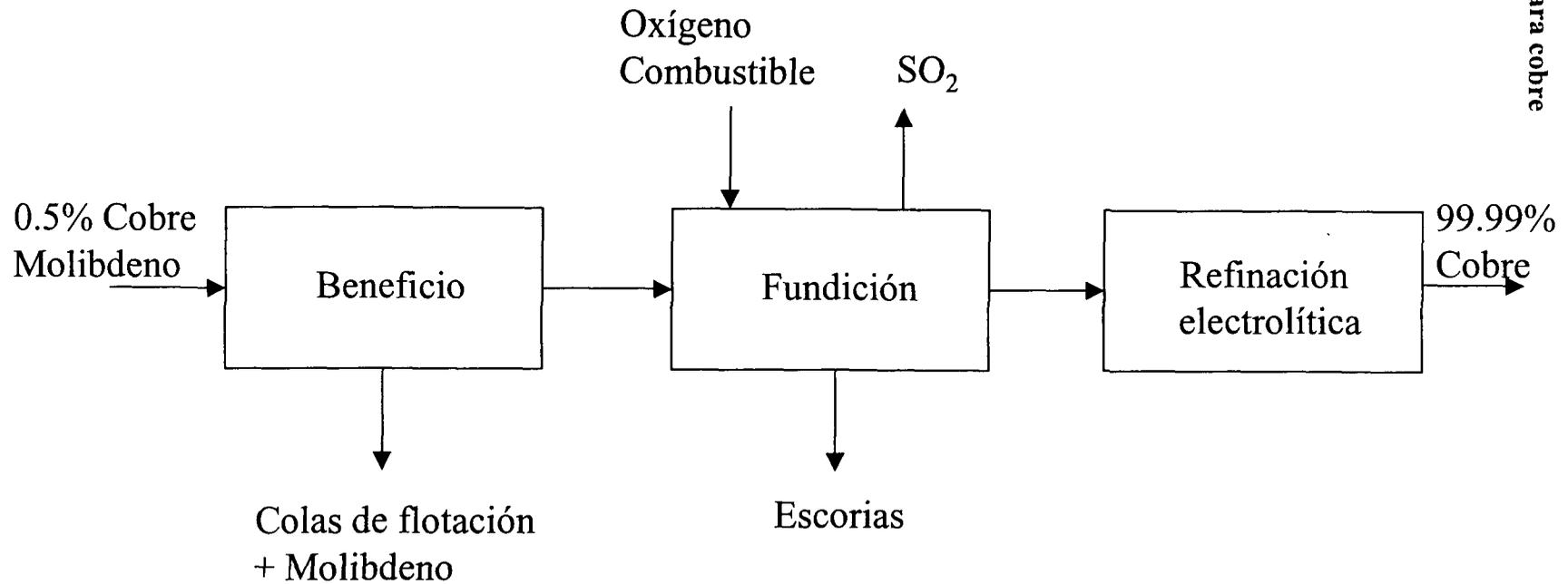


Figura 4.6.1 Diagrama de proceso para cobre

## 4.7 Fluorita

### Historia

La palabra fluorita proviene del latín fluo, que significa flujo. La fluorita o fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ) se considera vital para la seguridad nacional en los Estados Unidos debido a su uso en las plantas de energía nuclear. Es la materia prima principal que lleva a los compuestos del flúor. Su uso original fue en los hornos abiertos de fundición para la fabricación del acero. Su uso se disparó tremendamente a partir del desarrollo de los Clorofluorocarbonos (CFC's) como gases de refrigeración.

El primer uso que se tiene registro de la fluorita fue en 1529, cuando era utilizado como fundente. Sin embargo, su aprovechamiento industrial fue hasta 1880 (Kirk-Othmer).

### Localización y forma natural

El mayor productor de fluorita es China, seguido de México, Sudáfrica, Mongolia y Rusia. En México el principal productor de fluorita es Compañía Minera Las Cuevas, con operaciones en San Luis Potosí y Coahuila. Aún así, ha habido algunos cambios dentro de los productores de fluorita. DuPont anunció la venta de su participación dentro de Química Flúor (Matamoros, Tamaulipas) a Inmuebles Cantabria, como parte de su estrategia para mantenerse en los negocios más redituables para el grupo. Por otra parte, la compañía de origen belga, Grupo Solvay, adquirió Norfluor (Ciudad Juárez, Chihuahua), una planta más pequeña en comparación de Química Fluor, y cambió su nombre a Solvay Fluor México. La fluorita se encuentra mezclada en la naturaleza con proporciones variables de calcita, barita, cuarzo, esfalerita, galena, etc. (Kirk-Othmer)

### Propiedades

En la Tabla 4.7.1 se enlistan algunas propiedades importantes de la fluorita.

Peso molecular	78.08 g/gmol
Punto de fusión	1360 °C
Densidad @20 °C	3.18

**Tabla 4.7.1** Propiedades de la fluorita

La fluorita o espato flúor tiene un lustre vítreo. Puede ser transparente e incoloro, o presentar diferentes colores. Es abundante en la naturaleza.

#### Usos

El uso de la fluorita es el siguiente:

- Es la materia prima principal para la producción de ácido fluorhídrico (HF), el cual es un compuesto intermedio en la fabricación de los compuestos del flúor.
- En un fluido usado en la fabricación de acero, fundición de hierro, producción de aluminio, manufactura de vidrio y cemento.

#### Panorama económico actual

Los precios de la fluorita han estado variados y no presentan una tendencia clara a lo largo de los últimos años, si bien han existido factores que han afectado la demanda de fluorita tales como el veto impuesto a los CFC's, el crecimiento de las exportaciones de China y la competencia fuerte entre los mismos productores chinos. El precio promedio de la fluorita grado ácido y metalúrgico se reporta en la Tabla 4.8.2.

La producción de fluorita está dictada principalmente por la demanda que haya de HF, el cual todavía es buscado para la fabricación de Hidrofluorocarbonos (HFC's), los refrigerantes que están sustituyendo a los CFC's. Sin embargo, existe inquietud sobre el mercado debido a que por un lado, cada vez son más fuertes las exigencias por lograr circuitos de enfriamiento totalmente cerrados (eliminando así las ventas por reposición de gases refrigerantes), y a que también existe inquietud por la posible intervención que tengan los fluorocarbonos dentro del efecto de calentamiento global que sufre el planeta. El otro uso como grado metalúrgico también está severamente afectado por la crisis internacional de la industria siderúrgica y la sobreoferta de productos del acero.

	1997	1998	1999	2000	2001
Precio (G.A.)	120	120	120	120	112
Precio (G.M)	92	92	95	95	95

**Tabla 4.7.2** Precio promedio de fluorita grado ácido y metal, dólares por ton (USGS, 2002)

## Situación mundial de México

En la Tabla 4.7.3 se reporta la producción nacional de fluorita durante el final del siglo pasado en grado ácido y otros.

	1997	1998	1999	2000	2001
Grado Acido	290,580	330,711	324,741	335,000	343,000
Grado Otros	262,260	267,331	236,524	300,000	276,000
Total	552,840	598,042	561,265	635,000	619,000

**Tabla 4.7.3** Producción de fluorita en México, en toneladas métricas (USGS, 2002)

## Investigación y Tecnología

La compañía italiana Fluorsid reportó en una conferencia internacional de fertilizantes que había desarrollado una técnica para el tratamiento de aguas de proceso conteniendo HF, H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Mediante tratamiento con cal y floculantes, el jarabe formado es pasado por un clarificador y se filtra. Después, a presiones de 100 bar, se logran sólidos compactos que pueden tener un contenido entre 50% y 60% CaF<sub>2</sub>. Esta fluorita de bajo grado puede ser empleada en procesos cementeros y acelerar el tiempo de cocción de las materias primas, incrementado así la velocidad de proceso y por consiguiente la capacidad de la planta.

## Proceso de extracción y beneficio

La calidad de producto terminado de fluorita puede ser dividida en dos clasificaciones o grados de pureza. Si es mayor a 97% de CaF<sub>2</sub> se denomina grado ácido, y si es menor a 97% se le llama grado metalúrgico.

- El aprovechamiento de la mena se realiza mediante flotación, colocando el material en la superficie de una estructura cónica, en una suspensión de agua con ferrosilicato con diferencia de densidad de 2.55g/cm<sup>3</sup> en la superficie y 2.85 g/cm<sup>3</sup> en el fondo. Los minerales pesados como la fluorita, sulfuros y barita se hunden y se recuperan en el fondo del cono. La composición promedio de este concentrado es 45% fluorita, 4% zinc y 25% zinc (Kirk-Othmer).
- Por otra parte, el Industrial Minerals Handybook reporta que las concentraciones típicas para las dos principales minas en México, Fluorita de México y Las Cuevas,

contienen valores de 98.09% y 97.52% respectivamente, siendo el resto impurezas como SiO<sub>2</sub> y CaCO<sub>3</sub>. Estos valores se tomarán como meras referencias, ya que por su lado, Denver señala que dependiendo del grado de la fluorita es el método de flotación y la calidad final obtenida, en donde por ejemplo para el grado metalúrgico se parte de una concentración inicial de 32% para llegar al 92% final, mientras que para el grado ácido se parte de 72%. Los agentes de flotación son principalmente Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, silicato de sodio, Ácido Oleico y Aceite de Pino.

#### Impacto ambiental

El proceso de beneficio de minas de fluorita tiene relativamente bajo impacto ambiental en comparación del proceso de transformación de la fluorita en los distintos compuestos del flúor. Para el alcance de este trabajo, se determina que el impacto ambiental derivado del proceso de purificación de la fluorita es despreciable.

#### Indicadores

En la Figura 4.7.1 se puede observar el diagrama de flujo del beneficio de la mina de fluorita para los dos grados comerciales, ácido y metalúrgico aprovechados en México.

En la Tabla 4.7.4 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del proceso de beneficio de la fluorita.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales grado ácido	63.23%	Mg/Mg
Valor de producción grado ácido por uso de materiales	\$73.25	\$/Mg
Ecoeficiencia de materiales grado metalúrgico	27.05%	Mg/Mg
Valor de producción grado metalúrgico por uso de materiales	\$23.45	\$/Mg
Ecoeficiencia de materiales ambos procesos	37.32%	Mg/Mg
Valor de producción ambos grados por uso de materiales	\$40.24	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	\$/Mg

**Tabla 4.7.4** Indicadores de ecoeficiencia de la fluorita

La fluorita, debido a que es un proceso únicamente de flotación de minerales, no acarrea emisiones de gases de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> a la atmósfera. La diferencia entre el indicador de uso de materiales entre el grado ácido y el grado metalúrgico es debido al método y cantidad de agentes de flotación reportados en la literatura.

# Fluorita

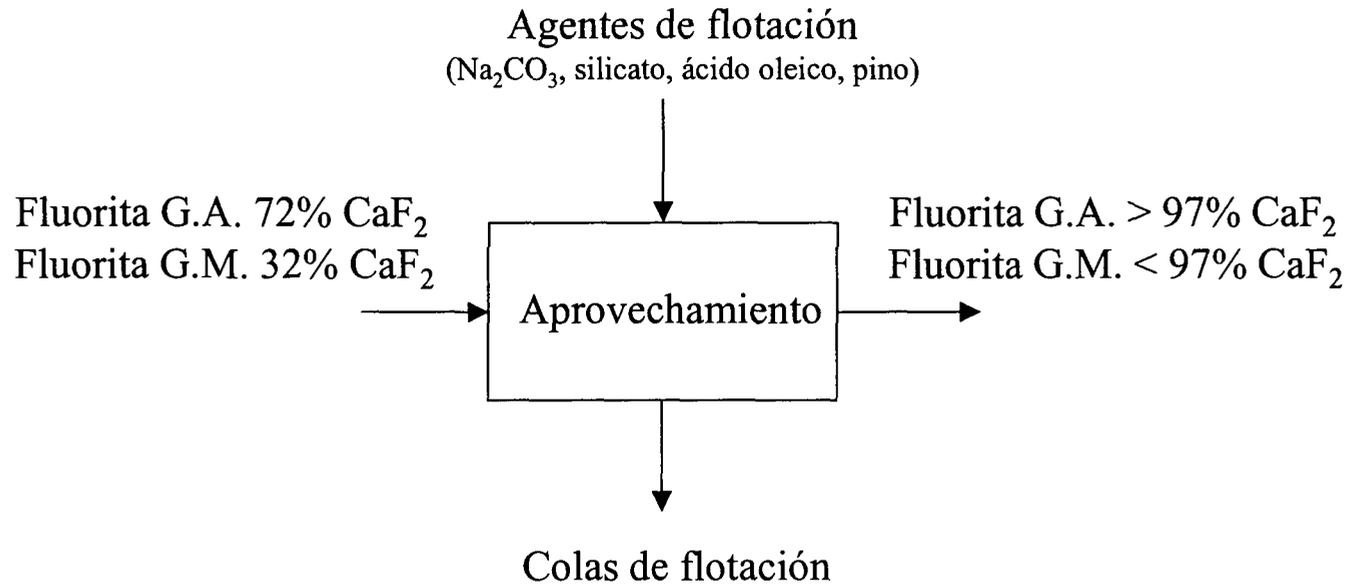


Diagrama de proceso para fluorita

- Proceso de flotación similar para fluorita grado ácido y grado metalúrgico

Figura 4.7.1 Diagrama de proceso para fluorita

## 4.8 Grafito

### Historia

El grafito es otra forma de los cristales del carbón junto con los diamantes. También es llamado plumbagina o lápiz de plomo, ya que por mucho tiempo se creyó que contenía dicho metal. Grafito viene de la palabra griega “*grafein*” que significa escribir. En 1565 Gessner lo reconoció por primera vez como mineral genuino y Scheele, en 1779, demostró que se oxidaba para convertirse en CO<sub>2</sub>, demostrando su estructura carbónica. Se comercializan tres tipos diferentes de grafito: hojuela, chip o terrón y amorfo, siendo el chip el de mayor valor en el mercado. Su uso original fue en la fabricación de lápices, como lubricante y algunas aplicaciones eléctricas.

### Localización y forma natural

El mayor productor de grafito en el mundo es China, seguido de India, Brasil, México, República Checa y Corea del Norte.

En México, el tipo de grafito más común es el amorfo, el de más bajo precio en el mercado. El principal productor de este mineral es Grafitos Mexicanos S.A, una inversión mayoritariamente mexicana, aunque con capital de la estadounidense Cummings Moore Graphite Company, con minas en Lourdes y San Francisco, en Sonora. Otra empresa dedicada a este mineral es Grafito Superior, que cuenta con locaciones en Covalmar, Santa Clara y Río Mayo (todas en Sonora). Las minas de Sonora son mundialmente famosas y han sido explotadas desde 1891.

El grafito se encuentra en rocas como mármol, schist y gneiss. Es un mineral suave que también es llamado plomo negro o carbón mineral. Existen dos tipos de grafito, ya sea natural o sintético. Los depósitos de grafito generalmente suceden como capas de hojuelas ya sean compactas o diseminadas.

### Propiedades

Las propiedades físicas del grafito son altamente variables porque depende de la forma física y el contenido de carbono grafítico. Los datos más comunes son densidad entre 2.1 y 2.5, y punto de sublimación mayor a 3500 °C (Kirk-Othmer).

El grafito puede variar de color entre gris y negro, tono opaco y tiene brillo metálico. Es un material flexible, pero no elástico. Es un buen conductor de calor y electricidad, tiene características refractarias, y es químicamente inerte. Es untuoso. Se desgasta rápidamente y tiene una baja resistencia a la oxidación, lo cual limita su uso.

La principal diferencia entre las propiedades del diamante y del grafito es debido a que las capas del grafito son paralelas y tienen tal distancia entre ellas que permiten la entrada de sulfatos o nitratos.

Usos

El uso del grafito es en los siguientes campos:

- Como material refractario, baterías y celdas de combustible. Se puede usar debido a sus propiedades físicas de alta conductividad y ser inerte.
- Lubricante, aunque su uso ha disminuido por la exigencia de incremento de eficiencia.
- Fundición

Panorama económico actual

Los precios del grafito han permanecido estables, aunque se aprecia una tendencia creciente en el grado amorfo; sin embargo, las nuevas aplicaciones para el grafito se enfocan a lograr un mineral de mayor pureza. En la Tabla 4.37 se observa los precios internacionales del grafito amorfo entre 1997 y 2001.

	1997	1998	1999	2000	2001
Precio	0.153	0.192	0.225	0.230	0.230

**Tabla 4.8.1** Precio promedio del grafito amorfo mexicano, dólares por kilogramo (USGS, 2001)

Situación mundial de México

En la Tabla 4.8.2 se reporta la producción nacional de grafito durante el periodo 1997 a 2001.

	1997	1998	1999	2000	2001
Amorfo	46,707	42,893	27,781	30,330	21,442
Cristalino	1,275	568	0	0	0
Total	47,982	43,461	27,781	30,330	21,442

**Tabla 4.8.2** Producción de grafito amorfo y cristalino en México, en toneladas métricas (USGS, 2001)

### Investigación y Tecnología

Avances en tecnologías térmicas y de lixiviación ácida están permitiendo lograr un grafito de mayor pureza, lo que puede abrir oportunidades en desarrollos de alta tecnología. Actualmente se tienen nuevas aplicaciones en materiales de fricción, electrónicos, láminas y lubricantes especiales (USGS, 2001).

### Proceso de extracción y beneficio

El proceso de aprovechamiento del grafito es bastante rudimentario;

- La concentración promedio de carbono en las minas de Sonora es del 80%, siendo el resto cenizas y materia volátil. Los minerales asociados con el grafito mexicano son mica y arcilla principalmente (Kirk-Othmer).
- En México, debido a la textura fina y densa del grafito amorfo y su íntima asociación con la ganga, el proceso de flotación no es posible. En vez, se tiene que separar a mano la materia extraña o dejar que se meteorice a la intemperie.
- Una vez molido el material, la calidad puede mejorarse mediante separación por aire. Las empresas grandes efectúan la separación por tamaños y producen así diferentes clases comerciales (Kirk-Othmer).
- Es muy raro que el grafito amorfo sobrepase una concentración de carbono mayor al 85% (Ibidem).

### Impacto ambiental

No se reporta ningún impacto ambiental significativo por las operaciones de beneficio de grafito.

## Indicadores

En la Figura 4.8.1 se puede observar el diagrama de flujo del beneficio de las minas de grafito amorfo en México.

En la Tabla 4.8.3 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del proceso de beneficio del grafito amorfo.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	80.00%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	207.96	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	\$/Mg

**Tabla 4.8.3** Indicadores de ecoeficiencia del grafito

El grafito amorfo mexicano sigue un sencillo proceso de aprovechamiento, cuyo valor económico resultó en el mayor flujo económico por uso de materia prima, esto explicándose porque las separaciones se realizan incluso en forma manual, por lo que el indicador depende casi exclusivamente de la concentración del mineral. Tampoco tiene emisiones de gases de efecto invernadero y dispersión de tóxicos.

# Grafito

Diagrama de proceso para grafito

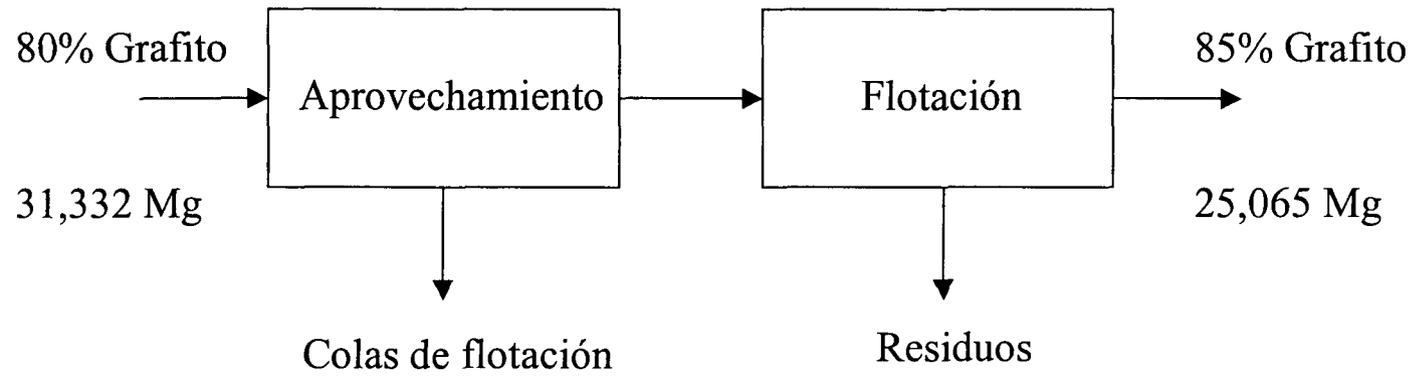


Figura 4.8.1 Diagrama de proceso para grafito

## 4.9 Molibdeno

### Historia

El molibdeno es un metal que fue aislado por primera vez por Helm en 1782. En 1910, la compañía General Electric preparó el primer molibdeno dúctil, lo que abrió paso durante las décadas siguientes a su utilización en alambres y láminas en la industria electrónica y la fabricación de lámparas eléctricas (Kirk-Othmer). Durante la segunda mitad del siglo XX fue que se aprovechó en motores a propulsión, en donde se requiere aprovechar su resistencia al calor.

### Localización y forma natural

El mayor productor de molibdeno en el mundo es Chile. México ocupó el sexto lugar en producción. Algunos otros países que también tienen importantes recursos de este metal son Estados Unidos, China, Perú y Canadá..

En México, el principal productor de plata es Mexicana de Cobre, propiedad de Grupo México. La planta se encuentra dentro del complejo de la mina La Caridad, en Sonora, dedicada principalmente a actividades de extracción de cobre. El producto que sale de esta mina es sulfuro de molibdeno.

El molibdeno se encuentra generalmente en las menas como sulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ) o molibdenita. Al ser aprovechado este mineral, generalmente puede contener residuos de otros metales como cobre, hierro y zinc.

### Propiedades

En la Tabla 4.9.1 se enlistan algunas propiedades importantes del molibdeno

Número atómico	42
Peso atómico	99.95 g/gmol
Punto de ebullición	4800 °C
Punto de fusión	2625 °C
Densidad @20 °C	10.2 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.9.1** Propiedades del molibdeno

La molibdenita es un mineral negro, muy semejante en aspecto al grafito aunque más pesada, con un contenido de 60% Mo. Otro mineral que provee molibdeno, aunque en mucho menor uso, es la wulfenita o  $PbMoO_4$ , que es fuente del trióxido de molibdeno.

#### Usos

El molibdeno se emplea en las siguientes industrias:

- Su uso principal (70%) es como agente para formar aleaciones de acero, fierro forjado y “súper aleaciones”, ya que aumenta las propiedades metalúrgicas como dureza, resistencia a corrosión, desgaste.
- Como químico encuentra aplicaciones en catalizadores, lubricantes y pigmentos.

#### Panorama económico actual

Se considera que existen reservas de molibdeno para satisfacer la demanda futura, en un mercado estable en donde se puede esperar un crecimiento en su uso en la industria del acero inoxidable. En la Tabla 4.9.2 se puede observar la tendencia de precios promedio en dólares por kilogramos, la cual se elevó en el año 2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	5.90	5.90	5.64	5.20	8.30

**Tabla 4.9.2** Precio promedio del molibdeno, dólares por kilogramo (USGS, 2003)

#### Situación mundial de México

En la Tabla 4.9.3 se reporta la producción nacional de molibdeno en el periodo 1998-2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	5,949	7,961	6,886	5,518	5,500

**Tabla 4.9.3** Producción de molibdeno en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

#### Investigación y Tecnología

Es un campo creciente de estudio la investigación de este metal debido a sus propiedades metalúrgicas. En general es difícilmente sustituible en sus aplicaciones, y lo que es más, se busca incrementar su utilización en mayor cantidad de aleaciones.

## Proceso de extracción y beneficio

Aunque en algunos países (Canadá o USA) existen minas en donde el molibdeno es el mineral de interés, en México no es el caso y el fabricante principal, Grupo México, lo obtiene en forma secundaria, derivado de sus operaciones de extracción de cobre en La Caridad. Por lo tanto, para este trabajo se tomarán algunos datos de la mena de cobre para realizar cálculos.

En la bibliografía de Gupta se encontró que el proceso de aprovechamiento de molibdeno puede dividirse en las etapas siguientes:

- Las menas de cobre varían en su concentración de molibdeno presente, por ejemplo la mina de Chuquicamata (Chile) contiene 0.063% Mo, Climax (USA) un 0.8% Mo y la mina Island Copper (Canadá) 0.016%. La mena pasa por el proceso de molienda y flotación para obtener el concentrado de interés de cobre, y adicionalmente presente el molibdeno a una concentración típica de 0.875% para el proceso en el complejo El Salvador (Chile). En el proceso de aprovechamiento de las minas de molibdeno se pierde un 20% del contenido original de este metal.
- Posteriormente pasa a un proceso de flotación para lograr la separación de los concentrados de molibdenita y cobre. Un valor típico (mina de Utah, USA) aproximado para la pureza de molibdenita es 90% MoS<sub>2</sub>. La pérdida de molibdeno en este proceso se calcula en promedio en 24% del mineral alimentado.
- Grupo México tiene especificación comercial para la venta de molibdenita. Este producto tiene una composición promedio 58% Mo, 37.5% S, y contiene en menores cantidades SiO<sub>2</sub>, Cu, Pb, Fe, Zn, Bi, etc.
- Este proceso puede ser ampliado para cuando se desea comercializar como óxido de molibdeno y ser aprovechado en las siderúrgicas.

## Impacto Ambiental

El molibdeno es un nutriente importante para plantas y animales, aunque los rumiantes tienen un estrecho margen entre la deficiencia nutricional y la toxicidad (USGS, 2001). Sin embargo, en minas abandonadas de molibdeno se ha podido sembrar pasto de tipo alto cuando se cubren las rocas residuales con astillas de madera y sólidos biológicos.

## Indicadores

En la Figura 4.9.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de molibdeno a partir de menas de cobre

En la Tabla 4.9.4 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del molibdeno.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.008%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	0.52	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción de molibdeno por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	0.03	Mg/Mg
Valor de producción de molibdeno por emisiones de SO <sub>2</sub>	208.63	\$/Mg

**Tabla 4.9.4** Indicadores de ecoeficiencia del molibdeno

El análisis dio por resultado que el molibdeno mexicano, obtenido como subproducto del proceso del cobre, tiene un bajo valor de ecoeficiencia de materiales, inclusive menor al reportado en minas más ricas de otros países como Estados Unidos y Chile. Aunque no contribuye al efecto invernadero, sí tiene dispersión de tóxicos por el uso de menas sulfuradas de cobre.

# Molibdeno

Diagrama de proceso para molibdeno

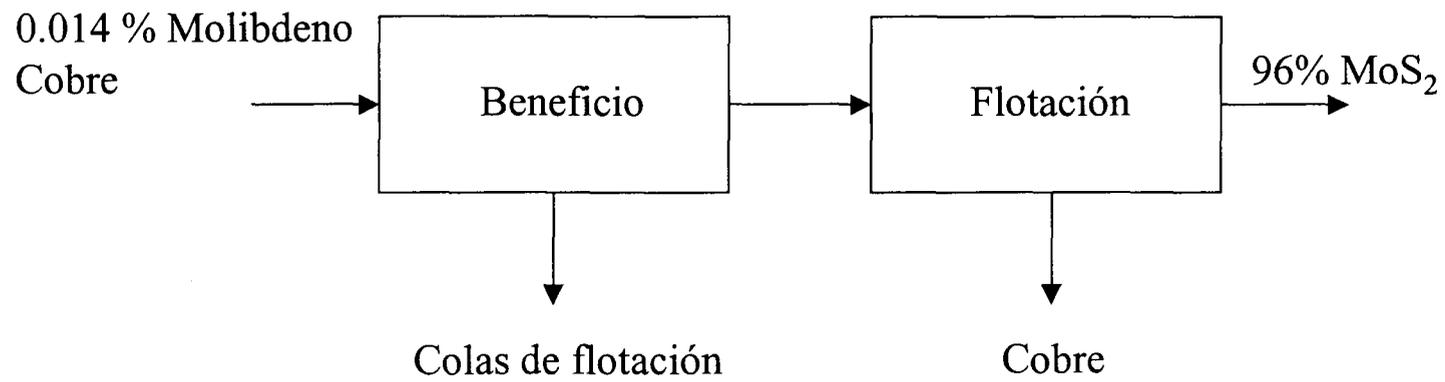


Figura 4.9.1 Diagrama de proceso para molibdeno

#### 4.10 Oro

##### Historia

El oro fue uno de los primeros metales conocido y utilizado por el hombre (Kirk-Othmer), ya que fue empleado inicialmente en la medicina por los antiguos chinos y egipcios. Se reporta que para el año 3000 AC ya había explotación de oro en Egipto. En la Edad Media fue tanto el interés de los señores feudales por este metal que se dieron los famosos alquimistas, quienes trataron infructuosamente de convertir otros metales en oro, lo que finalmente se convertiría en la base de la ciencia Química. El oro ha significado a lo largo de la historia un reflejo de la riqueza y el poder de las naciones y los individuos, y hasta hace algunos años, fue empleado como la base o patrón para la realización de transacciones comerciales a nivel mundial.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de oro en el mundo es Sudáfrica, donde resalta que hace 100 años no se producía este metal precioso. Otros países que son importantes proveedores de oro son Estados Unidos, Australia, China y Canadá. En Latinoamérica, Perú y Chile superan a México en la cantidad de oro producido.

En nuestro país, Peñoles es el principal productor con el 35% del mercado. Su principal mina es La Herradura (Caborca, Sonora), como una coinversión entre Peñoles y la norteamericana Newmont, además de contar con las minas de La Ciénega (Santiago Papasquiaro, Durango) y Las Torres-Cedros (Guanajuato). Otro productor importante es Grupo San Luis, con operaciones en Santa Rita y Tayoltita (Durango) y en Querétaro, mientras que Frisco opera la mina san Felipe, en Mexicali, B.C.

El oro, a diferencia de los demás minerales que se combinan fácilmente para formar compuestos sulfurados, generalmente se encuentra en estado elemental.

##### Propiedades

En la Tabla 4.10.1 se enlistan algunas propiedades importantes del oro.

Número atómico	79
Peso atómico	196.9 g/gmol
Punto de ebullición	2600 °C
Punto de fusión	1063 °C
Densidad @0 °C	19.32 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.10.1** Propiedades del oro

El oro puro es amarillo en su estado natural, caracterizado por su extraordinaria ductilidad y resistencia a la corrosión. Se encuentra en forma metálica y únicamente forma compuestos en forma natural con el telurio en forma de telururos. La calaverita, (Au, Ag) Te<sub>2</sub>, contiene aproximadamente 41% oro, 3% plata y 56% telurio, pero solamente se ha encontrado en zonas de Australia y Estados Unidos de América. El oro compone el 0.000001% de la corteza terrestre (Kirk-Othmer).

Además se considera altamente denso, excelente conductor de calor y electricidad. Debido a su bajo potencial de óxido-reducción, no es atacado fácilmente por los ácidos, aunque puede ser disuelto con agua regia (3:1 HCl-HNO<sub>3</sub>) y en soluciones alcalinas de cianuro en presencia de aire o peróxido de hidrógeno, propiedad que es factor importante para la extracción y refinación del metal.

#### Usos

El oro tiene aplicaciones en lo siguiente:

- Su uso principal (mayor al 85%) es en la joyería y obras artísticas. En este porcentaje se incluye la cantidad de oro que forma parte de las reservas mundiales de bancos y naciones.
- Dentro de la industria puede ser empleado como un conductor eléctrico de baja resistencia.

#### Panorama económico actual

Los precios del oro se han mantenido bajos para los intereses de los productores, lo que ha originado el cierre de minas y ha ahuyentado a los inversionistas, quienes consideran que el precio del oro genera un bajo retorno de inversión (USGS, 2000). Sin embargo, la

inestabilidad de la economía norteamericana y especulaciones sobre la debilidad del dólar han hecho que inversionistas compren oro como medida de protección, lo que origina múltiples transacciones de compra-venta de oro por parte de bancos. A tal grado ha llegado la incertidumbre del dólar, que los precios del oro han sentido un incremento considerable en el último trimestre del 2003 y de andar estancado en valores de \$280 por onza, ha llegado a rondar los \$400. En la Tabla 4.10.2 se reporta el precio promedio del dólar entre 1997 y 2001 según el índice de la Corporación Englehard; típicamente se reportan los precios en dólares por onza troy, aunque en la tabla se presenta la conversión a dólares por kilogramo

	1997	1998	1999	2000	2001
Precio	10,674.047	9,484.470	9,002.209	9,002.209	8,745.003

**Tabla 4.10.2** Precio promedio del oro, dólares por kilogramo (USGS, 2002)

#### Situación mundial de México

En la Tabla 4.10.3 se reporta la producción nacional de oro obtenido de minas durante el periodo 1997-2001. En la Tabla 4.10.4 se muestra la producción mexicana de oro refinado.

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	26.001	25.426	23.755	26.375	23.543

**Tabla 4.10.3** Producción de oro en México, en toneladas métricas (USGS, 2002)

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	24.532	25.298	22.050	24.074	25.749

**Tabla 4.10.4** Refinación de oro en México, en toneladas métricas (USGS, 2002)

#### Investigación y Tecnología

No se encontró información relevante sobre posibles nuevos usos del oro en aplicaciones adicionales.

## Proceso de extracción y beneficio

Las concentraciones de oro en las menas son de las más bajas entre los metales más comercializados, pero debido a su atractivo económico es que es redituable la búsqueda y extracción de este metal.

- La página [www.goldandsilvermines.com](http://www.goldandsilvermines.com) reporta que la abundancia de oro en la superficie de la Tierra es de 0.005 ppm. Se encuentra en su estado natural

Sin embargo, se considerará en este trabajo que la extracción de oro es por vía secundaria, proveniente de minas de plomo principalmente, al estar fuertemente asociada la presencia del oro con la plata, siendo en México la principal obtención vía la explotación de depósitos de plomo. Por lo anterior, se analizará el flujo de oro dentro del proceso normal del plomo.

- El Instituto de Minería y Metalurgia de Inglaterra reporta en la Tabla 4.10.5, las concentraciones promedio para minas mexicanas donde se aprovecha oro;

Mina	Concentración de oro (ppm)
San Francisco del Oro	0.38
Naica	0.20
Las Torres, Guanajuato	1.20

**Tabla 4.10.5** Concentraciones reportadas de oro en minas mexicanas

- El término doré aplica para el concentrado sin refinar que contiene principalmente oro y plata. Por mencionar un ejemplo, en 1987 Peñoles reportó un doré de 0.4 partes de oro por cada 100 de plata. El doré pasa por el proceso de partición en el que se busca la separación de ambos metales. La plata se disuelve mediante acción de un ácido, dejando el oro como residuo. Mediante electrólisis, la plata se deposita en el cátodo,
- En el ánodo se encuentra una sustancia viscosa color negro, con 25% de oro (Ibid). Una operación usual es limpiar cada 4 días estos depósitos. Se digiere con  $\text{HNO}_3$  a  $70^\circ\text{C}$  y se logra disolver el resto de metales. La solución resultante color café rojizo es lavada con agua desmineralizada, produciendo un metal con oro al 97%.
- Mediante el proceso Wohlwill (electrólisis) se logra refinar el oro con la presencia de un cátodo de titanio, utilizando como electrolito una solución de  $\text{AlCl}_3$ . Cada 24 horas puede removerse el oro depositado en el cátodo con una pureza del 99.95%.

La especificación de Peñoles marca un 99.99% mínimo de oro, con impurezas principalmente plata y cobre.

#### Impacto ambiental

Cuando se obtiene el oro por extracción secundaria, disminuye el posible impacto ambiental de este proceso debido a que sigue el mismo camino que la plata dentro del proceso del plomo. Por otro lado, si se hubiera realizado un análisis de extracción vía primaria, es decir directamente de minas de oro, el uso de soluciones con cianuro para lograr la lixiviación hubiera acarreado un mayor impacto ambiental por la solución remanente que debe ser tratada y el cuidado en general que implica manejar esa sustancia.

#### Indicadores

En la Figura 4.10.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de oro a partir de menas de plomo hasta la separación del doré y posterior refinación electrolítica.

En la Tabla 4.10.6 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del oro extraído de menas de plomo.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.00006%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	5.62	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	0.00013	Mg/Mg
Valor de producción de oro por emisiones de CO <sub>2</sub>	1,189.48	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	0.00004	Mg/Mg
Valor de producción de oro por emisiones de SO <sub>2</sub>	408.56	\$/Mg

**Tabla 4.10.6** Indicadores de ecoeficiencia del oro

El oro presenta valores bajos de ecoeficiencia en todos sus indicadores. Esto se explica porque por un lado es un metal de bajísima concentración en la naturaleza, y por otro lado al analizarse como un “subproducto” del proceso del plomo, su aprovechamiento trae implicaciones ambientales de consideración. Finalmente, es indudable que la explotación del oro, ya sea vía primaria o secundaria, trae consigo un impacto ambiental que las mineras deben responsabilizarse al momento de abandonar la mina.

# Oro

Diagrama de proceso para oro

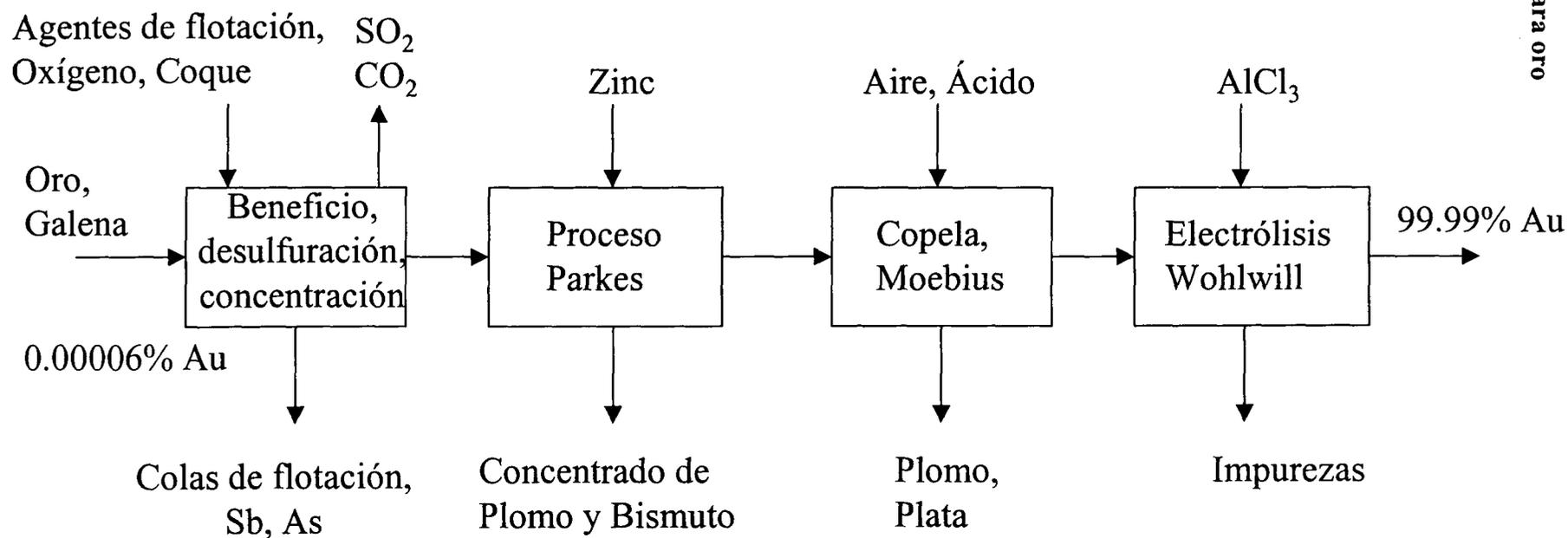


Figura 4.10.1 Diagrama de proceso para oro

#### 4.11 Plata

##### Historia

La plata es un metal que en sus orígenes fue empleado para artículos decorativos, joyería, vajillas y moneda. Su descubrimiento fue posterior al oro y el cobre. Los ornamentos más antiguos se remontan a periodos entre 3000 y 2500 a.C., presumiblemente de pre-hititas, y para el año 1000 antes de Cristo en Anatolia, Turquía, tenían técnicas para el lavado y concentrado mediante fundición de piezas de plomo.

Durante el siglo XVI, los españoles descubrieron la riqueza de América en minas de mayor concentración a lo que se conocía en el Viejo Mundo, por lo que rápidamente se volvió la fuente principal de plata en el planeta. Actualmente su uso decorativo es significativamente menor en comparación de sus aplicaciones industriales.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de plata en el mundo es México. Algunos otros países que también tienen importantes recursos de este metal son Perú, Australia, Estados Unidos y China. Esta brecha entre México y los demás países, particularmente Perú, ha ido disminuyendo en los últimos años.

En México, el principal productor de plata tanto en el país como a nivel mundial es Peñoles, que durante el año 2002 aportó el 57% del total nacional y que en los últimos años ha tenido niveles de producción récord. A nivel mundial, Peñoles aportó en el 2002 el 9% de la producción total (Silver Institute, 2003). Se considera que la mina de Fresnillo, Zacatecas, es la más importante productora del mundo, y ha operado casi continuamente desde el año 1550 (USGS, 2002). En el 2001 fue ampliada su capacidad y alcanzó un total de producción de 1610 toneladas. Las otras minas de plata se encuentran en Naica (Chihuahua), Tizapa (Guerrero), La Ciénega (Durango) y La Encantada (Coahuila). Minera Real de Ángeles, de Empresas Frisco, tiene su mina en Noria de Ángeles (Zacatecas). Grupo San Luis tiene su mina de metales preciosos en San Dimas, Durango. Grupo México es el cuarto productor a nivel mundial de plata con el 3.3% (Silver Institute, 2003), con minas en Sombrerete (Zacatecas), Taxco (Guerrero), Charcas (S.L.P.) y Santa Bárbara (Chihuahua).

La plata se encuentra generalmente en las menas como sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) o argentita. Generalmente se encuentra acompañada de otros metales de interés, como el oro, cobre, plata y zinc.

### Propiedades

En la Tabla 4.11.1 se enlistan algunas propiedades importantes de la plata.

Número atómico	47
Peso atómico	107.868 g/gmol
Punto de ebullición	2163 °C
Punto de fusión	961.9 °C
Densidad @20 °C	10.43 g/cm <sup>3</sup>
Calor específico @25 °C	0.235 J/(g K)

**Tabla 4.11.1** Propiedades de la plata

La argentita es color negro, mientras que la plata elemental es color blanco. Se considera que la plata es el metal con la mejor conductividad térmica y eléctrica. Es un metal más noble que el cobre, pero menos que el platino y el oro, propiedad que disminuye su resistencia a la corrosión. Tiene propiedades de maleabilidad y ductilidad buenas.

### Usos

La plata se emplea en las siguientes industrias:

- Su uso primordial (28%) es en el revelado de fotografías. Cabe mencionar que este uso es seriamente amenazado por el advenimiento de la fotografía digital que se almacena en archivos electrónicos y se puede imprimir sin necesidad de revelado.
- Algunos usos industriales son en productos eléctricos, como catalizador, amalgamas dentales y aleaciones. Los artículos electrónicos aprovechan la insuperable conductividad térmica y eléctrica de este metal. También se utiliza como recubrimiento en discos compactos y de video.
- Otro empleo importante, aunque menor en cantidad que los arriba mencionados, es como metal precioso, ya que es de interés para fabricar joyería, artículos decorativos, cuchillería y vajilla, y filatelia.

### Panorama económico actual

Los precios de la plata se han mantenido estables desde 1999, con ligera tendencia a la baja debido a la sobreoferta de material en el mercado hasta el año 2001. En el 2002 el crecimiento del precio fue de un 5%. La lista de precios promedio internacional se puede observar en la Tabla 4.11.2 según el indicador de Handy & Harman; comúnmente se reporta en dólares por onza troy, pero en la tabla se reporta la conversión a dólares por kilogramo (USGS, 2003). En México, el mercado se vio afectado por, entre otras cosas, la reanudación de actividades en la refinería de plata de Peñoles, localizada en Torreón, donde después de profundas investigaciones ambientales por presunta contaminación y efectos en la población, en febrero de 2000 fue liberada de restricciones para operar.

Una amenaza latente al uso de la plata es que su aplicación principal, la fotografía, está teniendo un avance tecnológico tremendo debido al crecimiento del uso de imágenes digitales que transforman electrónicamente las imágenes sin necesidad del uso de película. Si a esto se agrega que otra principal fuente de beneficio de plata es como subproducto de operaciones de zinc, industria que se encuentra en recesión actualmente, resulta que la producción de plata es poco alentadora.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	178.115	168.791	160.753	141.141	145.321

**Tabla 4.11.2** Precio promedio de la plata, dólares por kilogramo (USGS, 2003)

### Situación mundial de México

En la Tabla 4.11.3 se reporta la producción nacional de plata durante el periodo 1998-2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	2,686	2,466	2,620	2,759	2,852

**Tabla 4.11.3** Producción de plata en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

### Investigación y Tecnología

En el campo de aplicaciones dentales, científicos en Estados Unidos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) han desarrollado un polvo de plata pura para utilizarse en amalgamas, como sustituto del tradicional mercurio. Aunque las amalgamas de mercurio

se consideran seguras, es deseable su sustitución por las restricciones de toxicidad que le acompañan. También existen desarrollos en electrónica que ofrecen beneficios como circuitos electrónicos de plata ultrapequeños que pueden impactar el tamaño de dispositivos libres de cables. También en Medicina, a medida que la nanotecnología tiene un mayor desarrollo, surgen oportunidades de novedosos tratamientos que utilizan la plata como un recubrimiento conductor ultradelgado.

#### Proceso de extracción y beneficio

La plata es extraída de origen ya sea en minas al aire libre o subterráneas, y los procesos varían dependiendo del terreno, facilidad de transporte, profundidad de la mina, etc. En México la producción de plata es aproximadamente 50% proveniente de minas de plata, y el resto por vía secundaria por extracción de metales de cobre, plomo y zinc (USGS, 2002). En el resto del mundo, se extrae en un 70% por vía secundaria (Silver Institute, 2003).

- En la página de [goldandsilvermines.com](http://goldandsilvermines.com) se reporta lo siguiente: Las menas que se consideran “de plata” son llamada así no porque sea el mineral con mayor concentración en la piedra, sino que es el de mayor valor. La concentración típica reportada es 0.085% Ag, 0.5% Pb, 0.5% Cu y 0.3% Sb. Usualmente están presentes en forma de sulfuros, por lo que se encuentra galena, esfalerita y calcopirita.
- Sin embargo, la plata puede estar contenida bajo diferentes compuestos y en cada uno de ellos varía la concentración promedio de plata: la tetrahedrita o  $(\text{CuFeAg})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  hasta 20%, la tenantita o  $(\text{CuFeAg})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  hasta 6.5%, la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) un 0.17% y la calcopirita un 0.29%.
- Por otra parte, el Instituto de Minería y Metalurgia de Inglaterra reporta en la Tabla 4.11.4 las concentraciones promedio para minas mexicanas:

Mina	Concentración de plata (ppm)
Mina de Guanajuato	78
San Francisco del Oro	150
Naica	152
Las Torres, Guanajuato	230
Real de Angeles, Guanajuato	74

**Tabla 4.11.4** Concentraciones reportadas de plata en minas mexicanas

- Se considera que la extracción de plata es complicada debido a que en una misma mena se presentan varios minerales de plata, lo que genera una variedad de tamaño de partícula que vuelve más ineficiente el aprovechamiento del mineral. Las colas de flotación pueden contener porcentajes considerables de plata.
- Después del proceso de flotación. El concentrado alcanza valores de 1.7% Ag, 10-15% Pb, 10-15% Cu y 6% Sb.

Para este trabajo y a manera de ejemplo, se considerará que la plata se extrae en forma secundaria. En el caso de México, la plata tiene una importante fuente a partir de la extracción de plomo, por lo que se partirá de este proceso para los cálculos necesarios.

- El concentrado de plomo es tostado y fundido para producir un “bullion” con impurezas en el proceso de aprovechamiento de Pb.
- La remoción de la plata comienza mediante el proceso Parkes, en el que se agrega zinc al plomo fundido. El zinc reacciona rápidamente con la plata y el oro formando compuestos altamente insolubles tal que flotan en el “bullion”. La torta formada es tratada mediante vacío para retirar el zinc añadido.
- El residuo de plomo-plata-oro es tratado mediante un proceso denominado copela, en el que a un calentamiento (800 °C) bajo fuertes condiciones oxidantes atacan el plomo formando su óxido y permite su remoción. La copela es un proceso que data del año 500 y era conocido de los romanos para separar la plata del plomo. Su mecanismo depende de la oxidación selectiva de plomo, en la que el aire pasa a través del bullion fundido, haciendo que la plata se concentre en el baño
- El doré resultante es tratado con ácido para disolver la plata. Mediante electrólisis, se logra depositar la plata en forma de cristales en el cátodo de acero inoxidable.

La especificación de producto final para la plata, tomada de la compañía Grupo México, reporta tres diferentes grados de calidad, que van desde 99.93% plata, hasta 99.99% la calidad “extra”. Puede contener hasta 0.0008% Pb y 0.0001% Au. En comparación, la especificación de Peñoles marca un 99.99% mínimo Ag y valores máximos de 0.001% Fe, 0.003% Cu, 0.001% Pb, 0.001% Pd, 0.0005 Bi y 0.005% Se.

## Impacto ambiental

No se reportó algún impacto significativo en este proceso que sea atribuible a la plata, ya que la contaminación generada proviene principalmente de los flujos en mayor cantidad que son del plomo.

## Indicadores

En la Figura 4.11.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de plata a partir de menas de plomo hasta su refinación.

En la Tabla 4.11.5 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia de la plata extraída de menas de plomo.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	0.015%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	22.44	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	0.031	Mg/Mg
Valor de producción de plata por emisiones de CO <sub>2</sub>	4,750.37	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	0.011	Mg/Mg
Valor de producción de plata por emisiones de SO <sub>2</sub>	1,631.64	\$/Mg

**Tabla 4.11.5** Indicadores de ecoeficiencia de la plata

Debido a que es un metal precioso y en común con esto su presencia en la naturaleza no es abundante, era de esperarse valores bajos de ecoeficiencia en cuanto a uso de materiales, y al producirse bajo el aprovechamiento de un metal contaminante como el plomo, también contribuye con emisiones. La caída en sus precios contribuyó a que se situara en la parte media de la tabla comparativa de indicadores que consideran el flujo económico.

# Plata

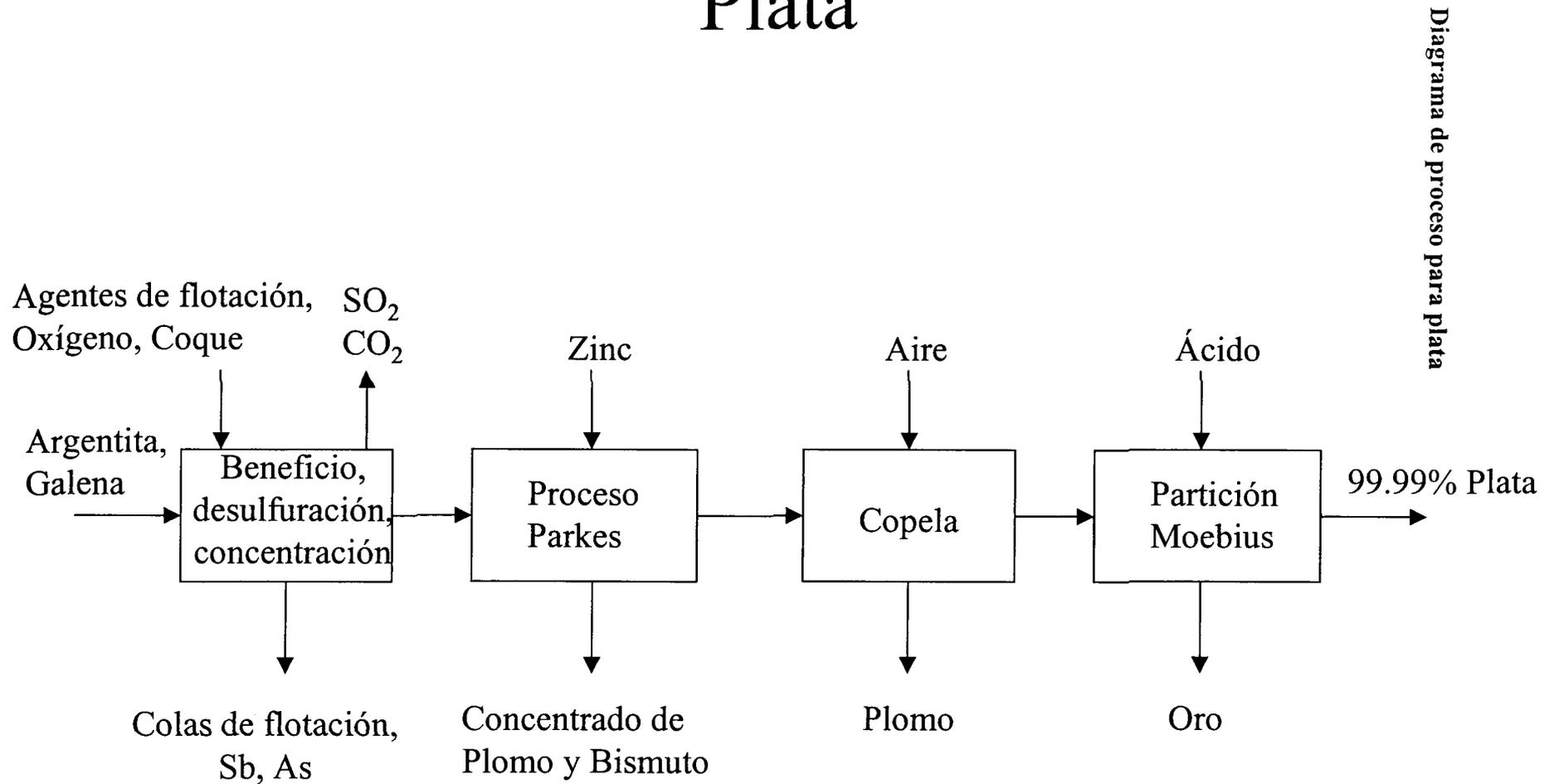


Figura 4.11.1 Diagrama de proceso para plata

#### 4.12 Plomo

##### Historia

El plomo se utilizó desde tiempos remotos al ser fundido para fabricar ornamentos, tubería, pesas y otros artículos, por lo que se considera “prehistórico” (Kirk-Othmer). Los egipcios del año 5000 AC lo utilizaban para vidriar la cerámica. Los chinos lo utilizaban antes del año 3000 AC, mientras que los antiguos romanos lo utilizaban para tubería.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de plomo en el mundo es Australia, seguido de cerca por China y los Estados Unidos. En menor medida, Perú y Canadá son otros importantes productores.

En México, Peñoles es el líder productor nacional con el 54%, siendo su mina principal Naica (Saucillo, Chihuahua), además de operaciones en Zimapán (Hidalgo), Ciénega (Durango). Tizapa (México) y Sabinas (Zacatecas). Grupo México acaparó el 25% de la producción, teniendo su mayor fuente en la mina de Santa Bárbara, en Chihuahua. Otro productor importante son la Minera San Francisco del Oro (Parral, Chihuahua) y Minera Real de Ángeles (Noria de Ángeles, Zacatecas), ambas pertenecientes a Empresas FRISCO. La principal fuente de obtención de plomo es de menas de sulfuro de plomo (PbS) conocido como galena, acompañado de otros materiales como cobre, hierro, zinc y metales preciosos. La presencia de los sulfuros provoca que en los sitios donde se benefician estas menas sean considerables fuentes de emisiones de dióxido de azufre.

##### Propiedades

En la Tabla 4.12.1 se enlistan algunas propiedades importantes del plomo.

Número atómico	82
Peso atómico	207.2 g/gmol
Punto de ebullición	1740 °C
Punto de fusión	327 °C
Densidad @20 °C	11.342

**Tabla 4.12.1** Propiedades del plomo

El plomo recién cortado es color plateado y color gris cuando se oxida. La galena por su parte es un mineral negro que frecuentemente se asocia con el zinc o con la plata. El plomo es un metal blando de alta densidad, bajo punto de fusión y alto de ebullición, baja ductilidad, alta maleabilidad. Es resistente a la corrosión y puede hacer aleaciones con estaño y antimonio. Los compuestos de plomo son muy tóxicos y son bioacumulables.

### Usos

Los principales usos del plomo son:

- En la industria del transporte, para la manufactura de baterías, tanques de combustible, piezas automotrices y copas de llantas.
- Instalaciones eléctricas, electrónicas y comunicaciones (baterías)
- Armamento, cristales para televisores, construcción (protección contra la radiación)
- En la industria química, cerámicos y cristales, láminas, cables, contenedores.

### Panorama económico actual

La producción mundial de plomo disminuyó durante el 2001, así como el precio del mismo, en donde el crecimiento de la industria en China y Malasia no pudo contrarrestar los recortes de los países europeos y norteamericanos. Sin embargo, el reporte de Minería Económica de Australia pronostica un crecimiento anual de 1.7% durante los próximos cinco años, más aún que consideran que la capacidad de las nuevas minas será insuficiente a comparación de las minas viejas que ya no se explotan, por lo que habrá menor oferta de plomo y ayudará al incremento en los precios. En la Tabla 4.12.2 se observa la tendencia de precios entre 1997 y 2001 según el London Metal Exchange.

	1997	1998	1999	2000	2001
Precio	0.624	0.529	0.502	0.454	0.463

**Tabla 4.12.2** Precio promedio del plomo en el London Metal Exchange, dólares por kg (USGS, 2002)

### Situación mundial de México

La producción de concentrado de plomo durante el periodo 1997 a 2001 se muestra en la Tabla 4.12.3. En la Tabla 4.12.4 se aprecia la producción nacional de plomo después del

proceso de refinación de forma primaria y secundaria (estimado), en donde se observa que en México la principal fuente de obtención es vía primaria.

En México existe una fábrica dedicada al reciclaje de baterías de plomo-ácido, situada en Tlaxcala. Sin embargo, esta planta no opera al total de su capacidad debido a que no han sido capaces de recolectar una cantidad suficiente de acumuladores automotrices para hacerla trabajar en forma continua.

	1997	1998	1999	2000	2001
Cantidad	174,661	166,060	125,656	137,975	136,413

**Tabla 4.12.3** Producción de concentrado de plomo en México, ton. métricas (USGS, 2002)

	1997	1998	1999	2000	2001
Primaria	169,510	163,645	111,136	143,223	143,523
Secundaria	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Total	180,000	174,000	121,000	153,000	154,000

**Tabla 4.12.4** Producción de refinería de plomo en México, ton. métricas. (USGS, 2002)

#### Investigación y Tecnología

No se encontraron reportes de investigación tecnológica sobre nuevos usos del plomo.

#### Proceso de extracción y beneficio

Se puede dividir en cuatro etapas principales:

- **Beneficio:** Se realiza en la mina o cerca de la misma y se procura eliminar las impurezas de otros minerales presentes. La concentración promedio de plomo en la mena es de 4.5%. Después de procesos de separación como la flotación, el concentrado puede contener hasta un 60% plomo (EPA,1995).
- **Sinterizado:** El objetivo es la eliminación de los sulfuros mediante la inyección de aire para oxidar la galena y convertirla en óxido de plomo. Se eliminan impurezas presentes de arsénico, antimonio y bismuto. Se tienen emisiones de SO<sub>2</sub> que usualmente se llevan a una planta de lavado para convertirla en ácido.

- Reducción: El PbO tostado se lleva a un horno en el que se agrega coque como combustible. Se tienen emisiones de CO<sub>2</sub>. El plomo fundido llega a una concentración promedio de 85% (EPA, 1995).
- Refinación: En esta etapa se realiza la remoción final de metales que pueden ser aprovechados en otros procesos, como oro y plata mediante el método de Parkes, remoción de zinc, separación de bismuto y finalmente un lavado de trazas de impurezas con hidróxido de sodio y nitrato de sodio. La concentración del producto final es al menos 99.99% plomo.

### Impacto ambiental

El plomo es uno de los metales más vigilados y con mayores restricciones por parte de los organismos ambientales gubernamentales debido a su toxicidad. El envenenamiento con plomo se conoce como saturnina y es una de las enfermedades ocupacionales más antiguas, ya que desde los griegos se tienen relatos de malestares por absorción de plomo.

### Indicadores

En la Figura 4.12.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de plomo.

En la Tabla 4.12.5 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del plomo.

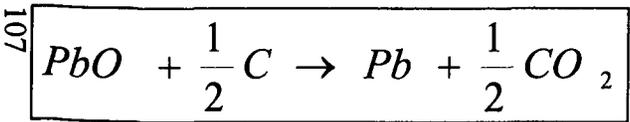
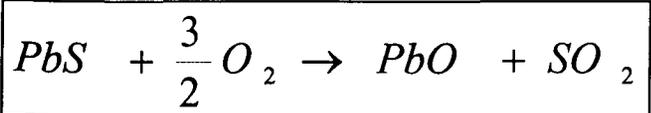
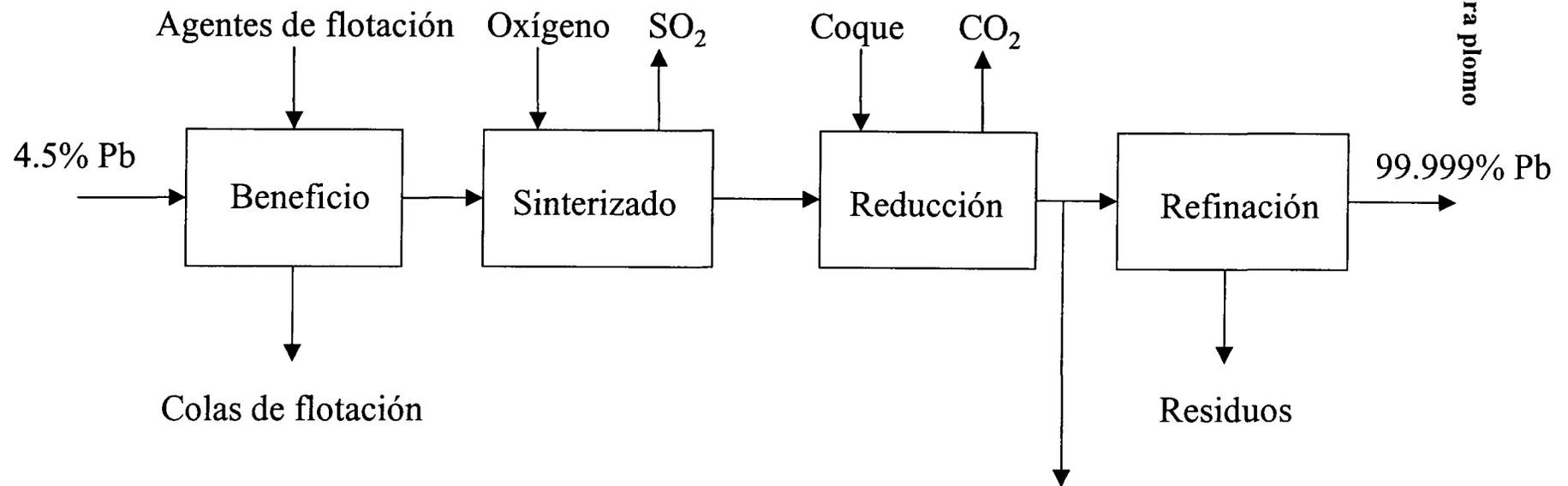
Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	4.45%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	22.88	\$/Mg
Producción de plomo por emisiones de CO <sub>2</sub>	9.42	Mg/Mg
Valor de producción de plomo por emisiones de CO <sub>2</sub>	4,843.72	\$/Mg
Producción de plomo por emisiones de SO <sub>2</sub>	3.23	Mg/Mg
Valor de producción de plomo por emisiones de SO <sub>2</sub>	1,663.71	\$/Mg

**Tabla 4.12.5** Indicadores de ecoeficiencia del plomo

El plomo se sitúa en todos sus indicadores a mitad de la tabla en comparación con los demás minerales. Tradicionalmente es considerada una industria contaminante y en realidad lo es, a lo que se podría añadir que entre los contaminantes es una de las que aporta mayor cantidad de producto por emisión de gases.

# Plomo

Diagrama de proceso para plomo



Eliminación de Sb, As  
Separación de Au, Ag  
Remoción de Bi

Figura 4.12.1 Diagrama de proceso para plomo

#### 4.13 Sal

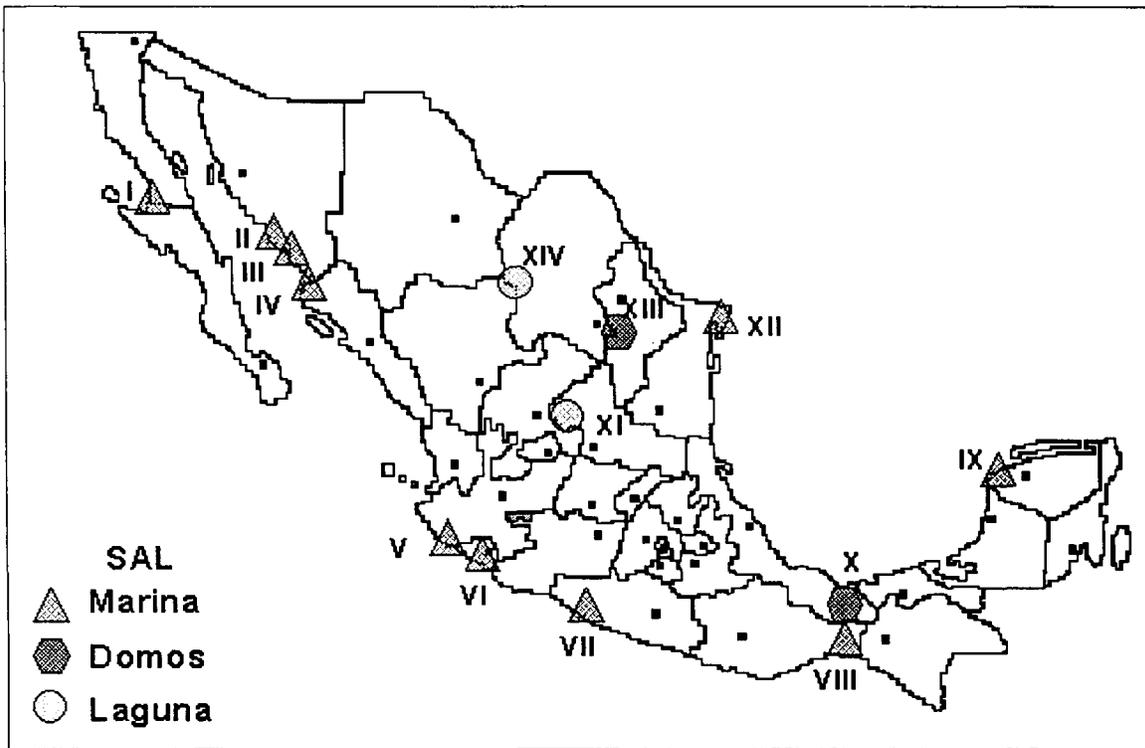
##### Historia

Aunque la palabra “sal” es un término genérico utilizado para los compuestos ácidos que sustituyen sus iones hidrógeno por un radical metálico, también se utiliza para nombrar químicamente al cloruro de sodio. En minería, la sal también es llamada halita. La palabra sal proviene del latín *sal*, palabra relacionada con el término griego *hals*, que significa mar. El uso de la sal va de la mano con la historia de la humanidad. Los primeros hombres, aunque de manera inconsciente, ya la aprovechaban en su consumo de carne de animales. Debido a su alta solubilidad, difícilmente la encontraba en la superficie, por lo que se fueron desarrollando técnicas para obtener la sal y comenzar la minería de ella. Poco ha cambiado desde entonces en el aprovechamiento de este mineral. Durante miles de años, la sal se utilizó principalmente como saborizante y conservador de alimentos. No fue hasta que se desarrolló en Bélgica el proceso Solvay que se empezó a utilizar la sal como materia prima en la industria química, esta vez en la fabricación de carbonato de sodio. Posteriormente se empleó en la electrólisis para fabricar cloro gas y sosa cáustica. La primera patente expedida en el continente americano fue para un proceso de extracción de sal, en el año de 1641 en Massachussets.

##### Localización y forma natural

El mayor productor de sal en el mundo son los Estados Unidos de América, seguido de China, Alemania, India y Canadá. México ocupa el séptimo lugar (USGS, 2003).

En México, el principal productor de sal es Exportadora de Sal S.A., conocida más comúnmente por su ubicación en el complejo de Guerrero Negro, Baja California Sur. Esta compañía es un inversión conjunta entre México y Japón. Otras regiones importantes productoras de sal reportadas por la Secretaría de Economía son Cd. Obregón y Navojoa (Sonora), Los Mochis (Sinaloa), costas de Jalisco, Colima y Yucatán, Petatlán (Guerrero), Salina Cruz (Oaxaca), Cuenca del Istmo (Veracruz), Salinas (S.L.P.), Matamoros (Tamaulipas), García (N.L.) y Sierra Mojada (Coahuila). En la Figura 4.13.1 se muestra el mapa de la República Mexicana con los principales yacimientos (SE, 2002).



**Figura 4.13.1 Principales yacimientos de sal en México**

La sal tiene varias formas de extracción, es un mineral muy común, teniendo reservas casi ilimitadas por ser el principal mineral disuelto en el agua de los océanos.

#### Propiedades

En la Tabla 4.13.1 se enlistan algunas propiedades importantes de la sal.

Peso atómico	58.443
Punto de ebullición	1413 °C
Punto de fusión	800 °C
Calor de fusión	123.59 cal/gramo

**Tabla 4.13.1** Propiedades de la sal

La sal es un mineral brillante, vítreo, con coloración variable entre incolora y blanca, aunque puede ser ocasionalmente roja, amarilla o azul. Es altamente diatérmica, plástica, viscosa y fluye a grandes presiones (SE, 2002). Es la materia prima principal para los productos que contienen sodio y cloro debido a que no hay muchos compuestos de sodio.

## Usos

La sal se emplea en las siguientes industrias:

- Su uso principal es en la industria química (41%), mayormente en los procesos de fabricación de cloro e hidróxido de sodio.
- Un uso importante, aunque únicamente para países con climas fríos, es como aditivo en las carreteras para disolver las capas de hielo que se forman en las carreteras y avenidas cuando baja la temperatura. En los Estados Unidos de América este uso alcanza hasta un 34% del consumo anual.
- El resto de sus aplicaciones se distribuye en uso industrial, agricultura, alimentos y tratamiento de aguas.

## Panorama económico actual

El mercado de la sal es muy estable ya que la tremenda oferta que existe impide fluctuaciones significativas en los precios. En ocasiones se han buscado sustitutos para la sal debido a posibles restricciones ambientales por su contenido de cloro, pero los materiales sustitutos no compiten con el precio ofrecido de la sal, por lo que no reditúa en mejores costos hacer reemplazos.

En la Tabla 4.13.2 se reporta el precio promedio de la sal, libre en planta, para sal proveniente de evaporación (“solar salt”) de 1998 a 2002

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	21.90	22.55	20.67	21.84	20.00

**Tabla 4.13.2** Precio promedio de la sal de evaporación, dólares por tonelada (USGS, 2003)

## Situación mundial de México

En la Tabla 4.13.3 se reporta la producción nacional de sal durante el periodo 1998-2002.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	8,412	8,236	8,884	8,501	8,700

**Tabla 4.13.3** Producción de sal en México, en toneladas métricas (USGS, 2003)

## Investigación y Tecnología

No se encontraron aplicaciones significativas sobre algún posible nuevo uso de la sal en otro proceso de manufactura.

## Proceso de extracción y beneficio

La sal tiene variadas formas de extracción. Uno es en aprovechamiento de minas de sal, actividad que data desde el Imperio Romano. Otra forma es mediante depósitos “encamados” de sal, en la que se encuentra asociada con otros minerales como piedra caliza, arena, yeso, etc. Son depósitos que acumularon cristales de sal originados de la evaporación de antiquísimos cuerpos de agua. Los domos de sal son similares a los depósitos, solamente que en vez de crecer lateralmente, son depósitos que se extienden verticalmente más de 20,000 pies. En ocasiones estos domos están asociados con petróleo, gas y azufre, por lo que su explotación es importante. Aunque en los Estados Unidos estos tres tipos de minas de sal aportan un 35% de su producción (Kostick, 1993), en México no es muy común este tipo de aprovechamiento. Sin embargo, un inconveniente de este tipo de minería es que en ocasiones se fragmentan demasiado las partículas (12-mesh ó 2 mm) y este tamaño de grano es muy fino para su uso final. Basado en curvas de distribución de tamaño de partículas, se puede perder un 27% de la sal minada.

La sal solar es obtenida de la extracción de por evaporación de agua de mar a lo largo de las costas y cuerpos cerrados de agua. El mecanismo de producción se basa en el aprovechamiento del viento y del sol para evaporar el agua, dejando de “residuo” los cristales de sal relativamente puros. Este tipo de proceso está restringido a zonas en donde exista una alta velocidad de evaporación y baja precipitación, como es el caso de Australia, India y México (Kostick, 1993).

La evaporación de agua marina puede involucrar la construcción de lagunas de concentración. La salmuera se deja evaporar para incrementar la salinidad y permitir que se precipiten los compuestos de calcio, magnesio y fierro presentes. La salmuera circula a través de lagunas interconectadas que van incrementando la concentración de sal. Este proceso puede llevar hasta 5 años antes de poder “cosechar” (Kostick, 1993). La salmuera es tratada con  $\text{CaCO}_3$  para eliminar el exceso de  $\text{CaSO}_4$ , y posteriormente es bombeada a lagunas para permitir la cristalización. Una vez que se tiene al menos un 85% de los

cristales de sal, se separa el líquido de la superficie para la extracción de compuestos de magnesio, potasio, bromo y sodio.

El flujo de materiales de sal, según el trabajo de Kostick, puede reducirse someramente en lo siguiente:

- 5% de pérdida de materiales en los procesos de molienda, cribado, lavado y secado de la producción de sal.
- 5% de pérdida de materiales en la refinación (mediante operaciones al vacío).
- 3% de pérdida de materiales en la “fabricación” o empaclado de sal en su presentación final para venta.
- La sal tipo industrial que se produce en México contiene 97.23% NaCl y el restante 2.19% es humedad (Metal Bulletin).
- La especificación de sal que publica la Secretaría de Economía tiene una pureza del 99.70% si es para fines industriales, suavizadores de agua o industria química (sal tipo gruesa o regular dependiendo del tamaño del grano). La sal fina se divide en la sal de mesa (99.9%) y sal de cocina (95-98%), ambas para consumo humano y la sal de deshielo (98%) para usarse en carreteras. La sal de menor calidad (90%) es en bloques y se utiliza como alimento de ganado (SE, 2002).

### Impacto ambiental

Debido a que la mayoría de las operaciones de aprovechamiento de depósitos de sal o de agua salada se realizan en superficies extensas de terreno, se considera que el perjuicio ambiental es mínimo al ecosistema, ya que las pérdidas de materiales o emisiones son controlables (Kostick, 1993).

Sin embargo, estas mismas grandes extensiones de terreno son cuestionadas por grupos ambientalistas debido a que desplazan especies propias de la zona. Se han llegado a cancelar proyectos de inversión en la península de Baja California debido a protestas de organismos no gubernamentales.

### Indicadores

En la Figura 4.13.2 se puede observar el diagrama de flujo del proceso de aprovechamiento de la sal.

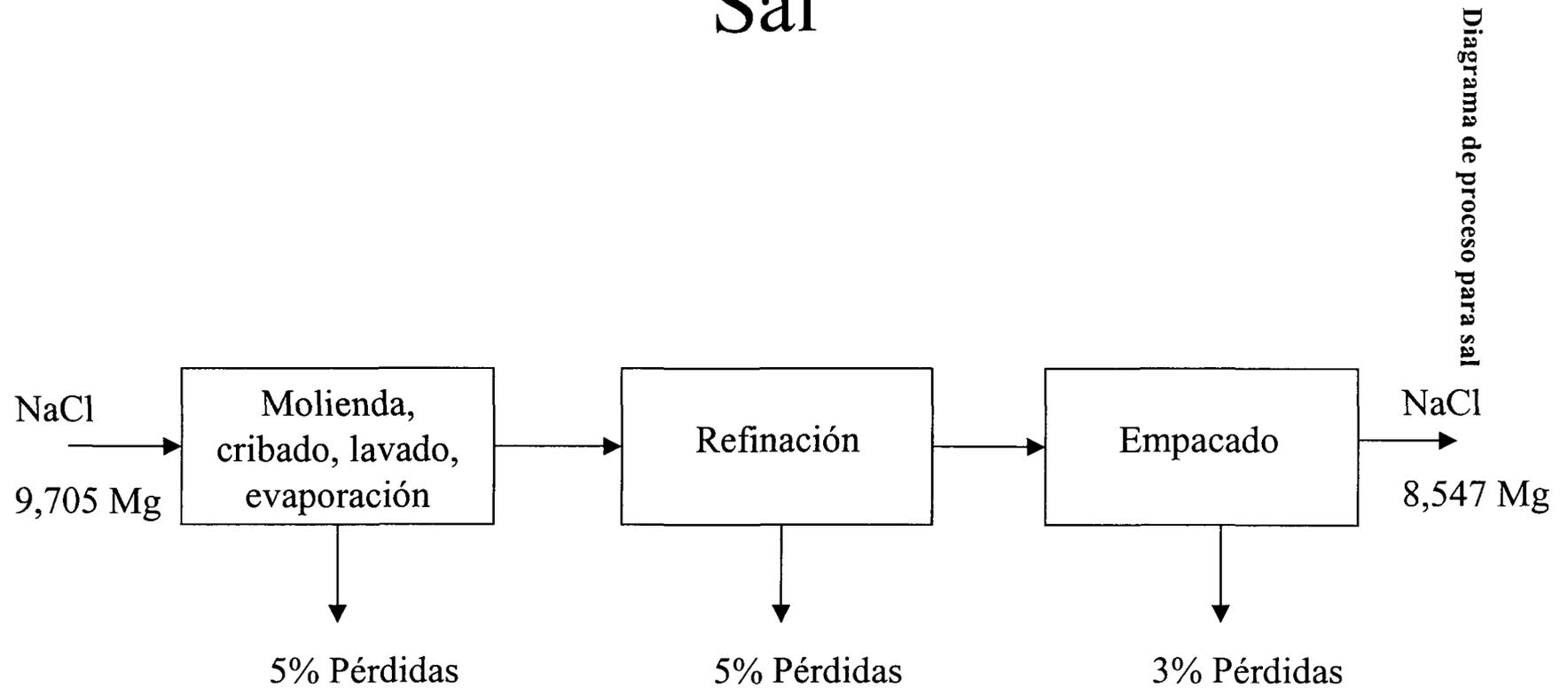
En la Tabla 4.13.4 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia para este mismo proceso.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	88.06%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	19.87	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Valor de producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	--	\$/Mg

**Tabla 4.13.4** Indicadores de ecoeficiencia de la sal

La sal ocupó el mejor indicador de ecoeficiencia de materiales, además no de contribuir en los indicadores de cambio climático y dispersión de tóxicos. Su proceso llevado mayormente en forma “natural” lo convierte en un proceso limpio, en el que únicamente se ha cuestionado las grandes extensiones territoriales que ocupa y que también sirven para el desarrollo de ecosistemas naturales.

# Sal



- Proceso vía solar

Figura 4.13.1 Diagrama de proceso para sal

#### 4.14 Zinc

##### Historia

El zinc es un metal que fue tardíamente descubierto debido a que no se encuentra libre en la naturaleza. El origen de la palabra es incierto, pero la creencia más aceptada menciona que proviene del término alemán “*Zinke*”, que a su vez viene de la palabra “*Zacke*” o “punta” debido a la apariencia de la mena. Su primer uso se remonta en la fundición de menas de cobre que resultaba en latón, método que era familiar de los Romanos en el años 200 a.C. Las piezas históricas más antiguas de zinc se remontan a la cultura Dacia en Transilvania. Los primeros registros de fundición del zinc se tienen en el siglo VII en China, donde se aprovechaba su propiedad de maleabilidad. Se sabe además que en la época de la dinastía Ming (1368-1644) ya existían monedas de este metal. Los hindúes lo explotaron antes del año 1380, y para 1743 se construyó un horno de fundición de zinc a partir de óxidos en Bristol, Reino Unido. Posteriormente se trasladaron operaciones a Bélgica y Alemania, y no fue sino hasta 1835 que se llevó a los Estados Unidos, para fundar posteriormente en 1860 la Compañía de Zinc de New Jersey en Pennsylvania. En 1758, en Inglaterra, John Champion recibió la patente para la obtención de zinc a partir de sulfuro de zinc, el cual es todavía el método principal de producción.

##### Localización y forma natural

Los productores principales de zinc en el mundo son China, Australia y Canadá, seguidos de Perú, Estados Unidos y México, aunque la principal zona productora del mundo se encuentra en el área “Red Dog” en Alaska (USGS, 2003).

En México, Peñoles incrementó la capacidad de su complejo metalúrgico en Torreón en el año 2000 a 220,000 toneladas anuales debido a la demanda de consumo interno por la industria de la construcción y automotriz. Se abrieron dos minas nuevas llamadas Rey de Plata (en Tehuixtla, Guerrero) como una coinversión entre Peñoles y compañías japonesas y la Francisco I. Madero (Zacatecas). Peñoles también tiene otras minas importantes en Bismark y Naica, en Chihuahua, Zimapán (Hidalgo) Tizapa (México) y Sabinas (Zacatecas). En este metal, Peñoles y Grupo México se reparten casi equitativamente el 90% de la producción nacional. Grupo México posee la principal mina de zinc en Las Charcas (San Luis Potosí), a la vez de operaciones en Santa Bárbara (Chihuahua), San Martín

(Zacatecas), Santa Eulalia (Chihuahua) y Taxco (Guerrero). Otro productor importante son la Minera San Francisco del Oro (Parral, Chihuahua) y Minera Real de Ángeles (Noria de Ángeles, Zacatecas), ambas pertenecientes a Empresas FRISCO.

La principal fuente (90% de la producción actual según Kirk-Othmer) de zinc es la esfalerita o sulfuro de zinc (ZnS), aunque también puede ser recuperado de otros minerales como la zincita (ZnO), franklinita (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) y la willemita (ZnSiO<sub>4</sub>).

### Propiedades

En la Tabla 4.14.1 se enlistan algunas propiedades importantes del zinc.

Número atómico	30
Peso atómico	65.39 g/gmol
Punto de ebullición	907 °C
Punto de fusión	419 °C
Densidad @25 °C	7.133 g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 4.14.1** Propiedades del zinc

El zinc puro es color blanco azulado, el cual se encuentra presente en aguas saladas y dulces (< 10 µg/L) y suelos naturales (50 ppm) así como en la atmósfera. Ocupa el 0.0065% en la corteza, siendo el elemento 24 en abundancia. Se conocen más de 55 minerales de zinc, aunque los viables comercialmente son los que se mencionaron anteriormente. La concentración en la mena varía entre valores de 2 a 12%. El zinc puro es dúctil a temperatura ambiente y es altamente afectado en sus propiedades mecánicas por la presencia de impurezas, razón por la cual se busca la máxima concentración posible.

Su propiedad química más significativa es su alto potencial de reducción, lo que le permite desplazar iones de hierro en solución y ser empleado para cubrir acero.

La esfalerita por su parte es color canela claro a negro, con aspecto resinoso. Su coloración depende del contenido de hierro. Es insoluble en agua. Cuando está húmedo, se oxida lentamente en el aire y se transforma en sulfato.

## Usos

Los principales usos del zinc son:

- Recubrimiento de piezas de acero (proceso de galvanizado).
- Fabricación de aleaciones como el bronce y latón
- En la industria química como óxido de zinc en procesos de pintura y elásticos.

## Panorama económico actual

En el año 2002, el precio del zinc según el London Metal Exchange alcanzó su nivel más bajo en una década (USGS, 2003). Debido a la prolongada recesión económica mundial, al poco prometedor panorama inmediato y la sobreoferta del metal, no se espera una recuperación de precios. Lo anterior ha llevado al cierre y venta de minas, así como a paros en los procesos productivos. El Tratado de Libre Comercio de América del Norte ha beneficiado a México en el sentido de poder exportar a los Estados Unidos concentrado de zinc, metal y chatarra libres de impuestos, originado también por la insuficiente capacidad de fundición (en comparación con su consumo) de los Estados Unidos. Sin embargo, México ha resentido la disminución en el precio del zinc, lo que ha ocasionado el cierre de operaciones de Peñoles en Rey de Plata, en Guerrero, y ha postergado el inicio de trabajos en una nueva mina de Teck Cominco en la mina San Nicolás, Zacatecas.

Cabe señalar que la industria del zinc ha estado hundida en una crisis que la mantiene como poco rentable. Se reporta que durante la década de los noventa, la tasa de retorno de inversión de la industria del zinc fue de 0.7%, comparado con el 10.3% obtenido por las empresas dedicadas al cobre. En la Tabla 4.14.2 se reporta el precio promedio en efectivo (dólares por kilogramo) entre 1998 y 2002 en el London Metal Exchange.

	1998	1999	2000	2001	2002
Precio	1.023	1.075	1.128	0.886	0.793

**Tabla 4.14.2** Precio promedio del zinc en el LME, dólares por kg (USGS, 2003)

## Situación mundial de México

La producción de concentrado de zinc en México entre 1998 y 2002 se menciona en la Tabla 4.14.3. En la Tabla 4.14.4 se muestra la producción de hornos de fundición en el país para el mismo periodo.

	1998	1999	2000	2001	2002
Cantidad	395,391	360,000	392,791	428,828	475,000

**Tabla 4.14.3** Producción de concentrado de zinc en México, ton. métricas (USGS, 2003)

	1998	1999	2000	2001	2002
Primaria	230,325	218,913	235,073	303,810	320,000

**Tabla 4.14.4** Producción de hornos de fundición de zinc en México, ton métricas (USGS, 2003)

#### Investigación y Tecnología

La compañía Metallic Power, dedicada a producir celdas de energía, ha concluido pruebas de lo que puede llegar a ser el primer vehículo que utiliza celdas recargables de zinc como combustible. El vehículo alcanza velocidades de hasta 80 km/h y se recarga mediante pellets de zinc.

#### Proceso de extracción y beneficio

Debido a su baja concentración en la mena, es necesario elevar este parámetro mediante operaciones en la mina.

- La concentración de la mena de zinc varía entre un 3 y un 11% (EPA, 1995), por lo que se tomará una media de 7% para los cálculos de este trabajo. A manera de confirmar este dato, se encontró en el Mining Annual Review de 1999 que algunos valores reportados de minas mexicanas indican una concentración de 6.7% en Bismark, 8.5% en Tizapa y 5.2% en la Francisco I. Madero, por lo que el dato promedio de 7% se encuentra apegado a los valores para minas mexicanas. En estas minas también existe presencia de plomo, pero los valores son alrededor del 1%, valor muy por debajo del valor usual para aprovechar este metal vía primaria.
- El beneficio de la mena involucra operaciones de molienda, cribado y flotación de los materiales, produciendo un concentrado de 50%-60% de zinc (EPA, 1995).
- La reducción de la esfalerita concentrada a zinc metálico comienza con el tostado de los sulfuros, agregando aire, para convertirlo en óxido de zinc. En esta etapa se producen emisiones de SO<sub>2</sub> al 7%.

- Una vez libre de sulfuros, se agrega coque para quemar el oxígeno y producir zinc metálico, provocando emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Finalmente, el zinc puede ser refinado electrolíticamente para alcanzar la pureza requerida.

#### Impacto ambiental

El zinc no es tóxico para la salud humana, solamente a partir de dosis de 10 g se empiezan a sentir efectos de náuseas. Por otro lado, en el proceso productivo, el zinc es relativamente poco peligroso si se le compara con otros metales que comúnmente lo acompañan tales como plomo, cadmio y cobre. La presencia de cadmio provoca que la toxicidad de los residuos se eleve y es necesaria una adecuada disposición del mismo. Es necesario además vigilar la calidad de agua residual debido a los metales contenidos. En el proceso de fundición se dan emisiones de partículas y dióxido de azufre, así como el cadmio remanente, todas las cuales deben ser tratadas mediante bolsas colectoras, ciclos de lavado y torres de absorción.

#### Indicadores

En la Figura 4.14.1 se puede observar el diagrama de flujo para la producción de zinc desde el aprovechamiento de las minas hasta la refinación.

En la Tabla 4.14.5 se reportan los principales indicadores de ecoeficiencia del zinc.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales	4.52%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales	44.35	\$/Mg
Producción por emisiones de CO <sub>2</sub>	2.97	Mg/Mg
Valor de producción de zinc por emisiones de CO <sub>2</sub>	\$2,915.20	\$/Mg
Producción por emisiones de SO <sub>2</sub>	1.02	Mg/Mg
Valor de producción de zinc por emisiones de SO <sub>2</sub>	1,001.30	\$/Mg

**Tabla 4.14.5** Indicadores de ecoeficiencia del zinc

Dentro de los minerales metálicos, el zinc es el que registró un mayor índice de ecoeficiencia de materiales debido a su mayor concentración en la mina que los demás

metales, razón que también se refleja en el indicador de valor de producción, que le otorga el tercer mayor flujo económico entre los minerales analizados, y el mayor entre los minerales metálicos. En los indicadores de emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se sitúa en niveles promedio-bajo, pero sin llegar a ser de los tres últimos.

# Zinc

Diagrama de proceso para zinc

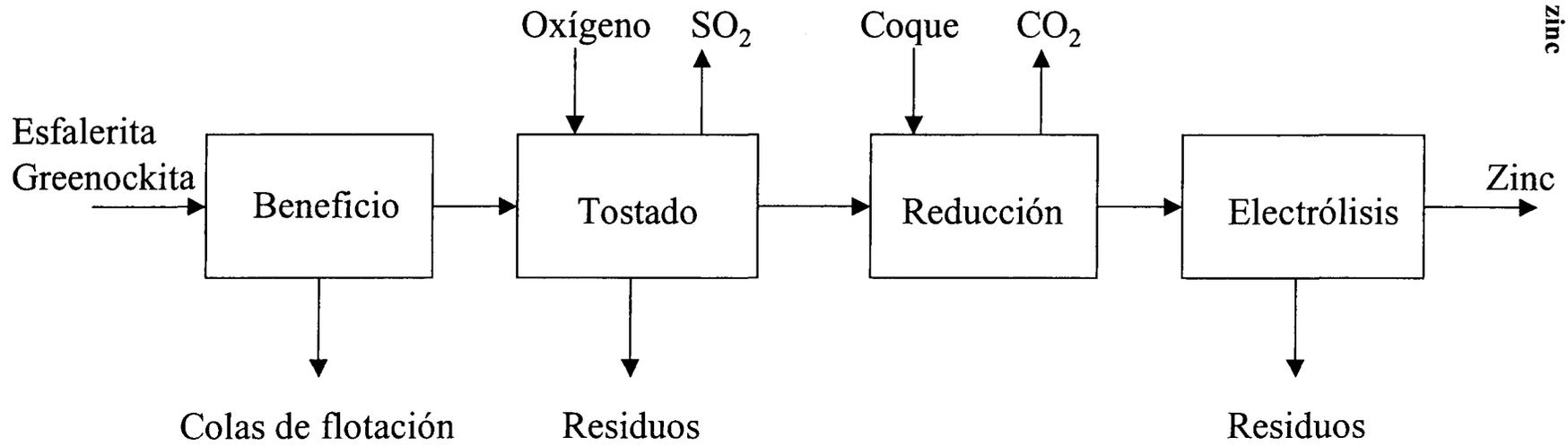


Figura 4.14.1 Diagrama de proceso para zinc

#### *4.15 Procesos unificados*

En esta sección se incluyen los diagramas de proceso para los tres sistemas que incluyen los minerales principales junto con los de extracción secundaria, con el fin de presentar la totalidad del proceso, siendo estos:

- Proceso Pb-Bi-Ag-Au, para el sistema plomo, bismuto, plata y oro
- Proceso Cu-Mo, para el sistema cobre y molibdeno
- Proceso Zn-Cd, para el sistema zinc y cadmio

En la Tabla 4.15.1 se reportan los índices de ecoeficiencia para estos procesos, incluyendo la aportación individual de cada metal al índice global, con el fin de observar cuál es el que influyen principalmente en el índice del proceso.

Indicador	Resultado	Unidades
Ecoeficiencia de materiales Pb-Bi-Ag-Au (Pb-Bi-Ag-Au)	4.48% 4.45%+0.016%+0.015%+0.00006%	Mg/Mg
Ecoeficiencia de materiales Cu-Mo (Cu-Mo)	0.500% 0.492%+0.008%	Mg/Mg
Ecoeficiencia de materiales Zn-Cd (Zn-Cd)	4.54% 4.52%+0.02%	Mg/Mg
Valor de producción por uso de materiales Pb-Bi-Ag-Au (Pb-Bi-Ag-Au)	\$52.24 \$22.88+\$1.31+\$22.44+\$5.62	\$/Mg
Valor de producción por uso de materiales Cu-Mo (Cu-Mo)	\$8.54 \$8.02+\$0.52	\$/Mg
Valor de producción por uso de materiales Zn-Cd (Zn-Cd)	\$44.45 \$44.36+\$0.09	\$/Mg
Producción Pb-Bi-Ag-Au por emisiones de CO <sub>2</sub> (Pb-Bi-Ag-Au)	9.481 9.42+0.034+0.031+0.0001	Mg/Mg
Producción Cu-Mo por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	Mg/Mg
Producción Zn-Cd por emisiones de CO <sub>2</sub> (Zn-Cd)	2.987 2.972+0.015	Mg/Mg
Valor de producción de Pb-Bi-Ag-Au por emisiones de CO <sub>2</sub> (Pb-Bi-Ag-Au)	\$11,061.72 \$4,843+\$278+\$4,750+\$1,189	\$/Mg
Valor de producción de Cu-Mo por emisiones de CO <sub>2</sub>	--	\$/Mg
Valor de producción de Zn-Cd por emisiones de CO <sub>2</sub> (Zn-Cd)	\$2,921.36 \$2,915.2+\$6.16	\$/Mg
Producción Pb-Bi-Ag-Au por emisiones de SO <sub>2</sub> (Pb-Bi-Ag-Au)	3.257 3.23+0.011+0.010+0.00004	Mg/Mg
Producción Cu-Mo por emisiones de SO <sub>2</sub> (Cu-Mo)	2.018 1.984+0.034	Mg/Mg
Producción Zn-Cd por emisiones de SO <sub>2</sub> (Zn-Cd)	1.026 1.021+0.005	Mg/Mg
Valor de producción de Pb-Bi-Ag-Au por emisiones de SO <sub>2</sub> (Pb-Bi-Ag-Au)	\$3,799.44 \$1,663+\$95+\$1,631+\$408	\$/Mg
Valor de producción de Cu-Mo por emisiones de SO <sub>2</sub> (Cu-Mo)	\$3,444.26 \$3,235.6+\$208.6	\$/Mg
Valor de producción de Zn-Cd por emisiones de SO <sub>2</sub> (Zn-Cd)	\$1,003.42 \$1,001.3+\$2.12	\$/Mg

**Tabla 4.15.1** Indicadores de ecoeficiencia para los procesos unificados

# Pb-Bi-Ag-Au

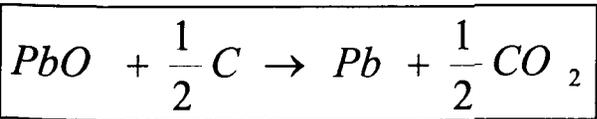
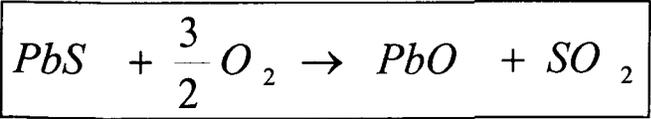
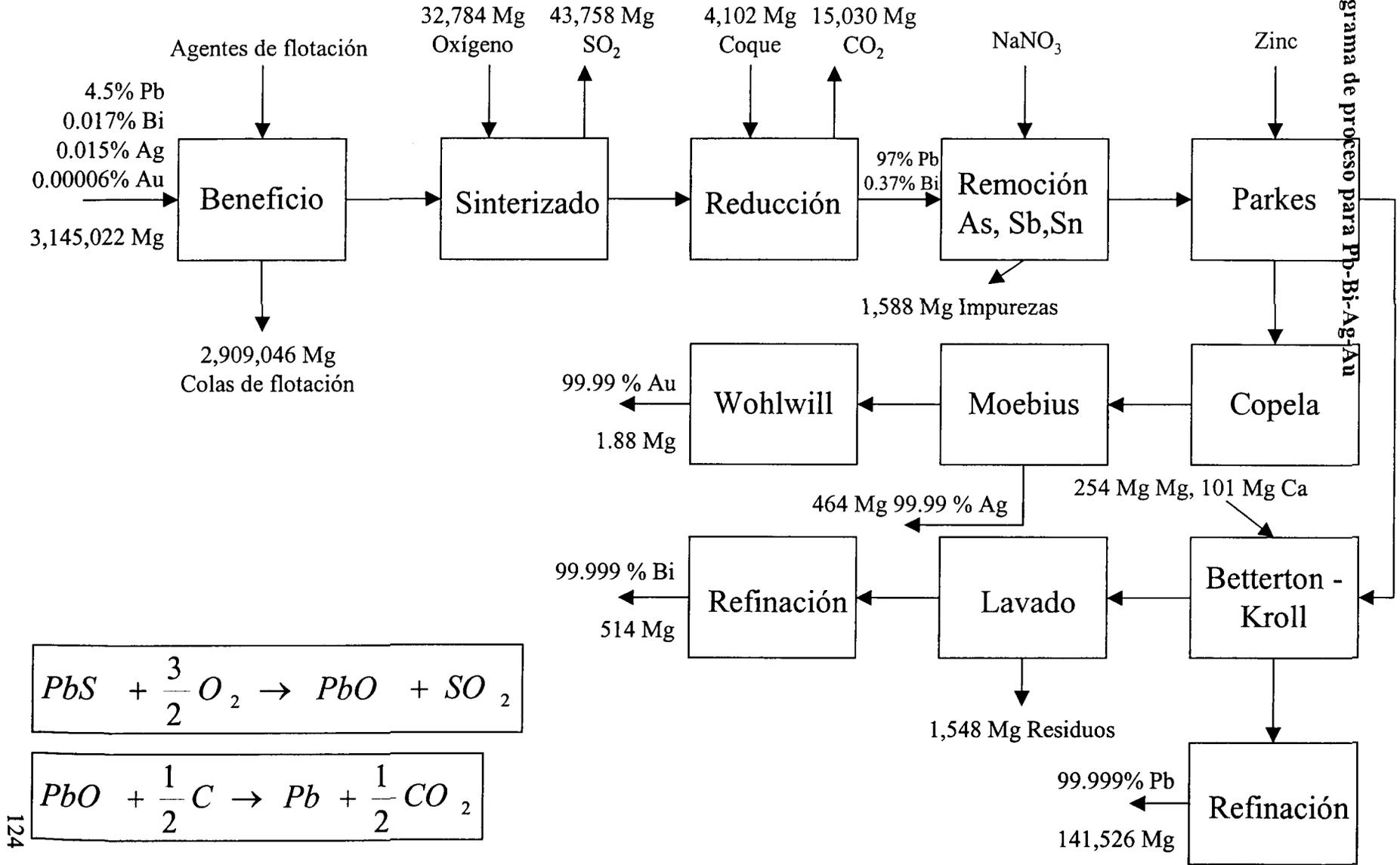


Figura 4.15.1 Diagrama de proceso global para obtención de Pb-Bi-Ag-Au

# Cu-Mo

Diagrama de proceso para Cu-Mo

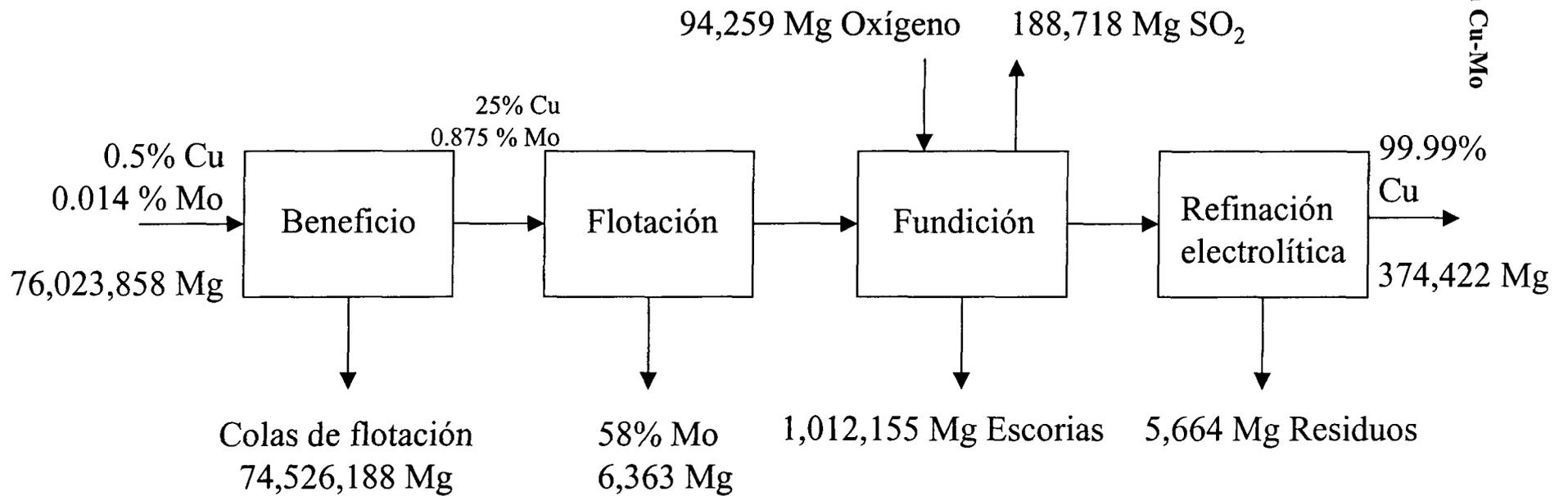


Figura 4.15.2 Diagrama de proceso global para Cu-Mo

# Zn-Cd

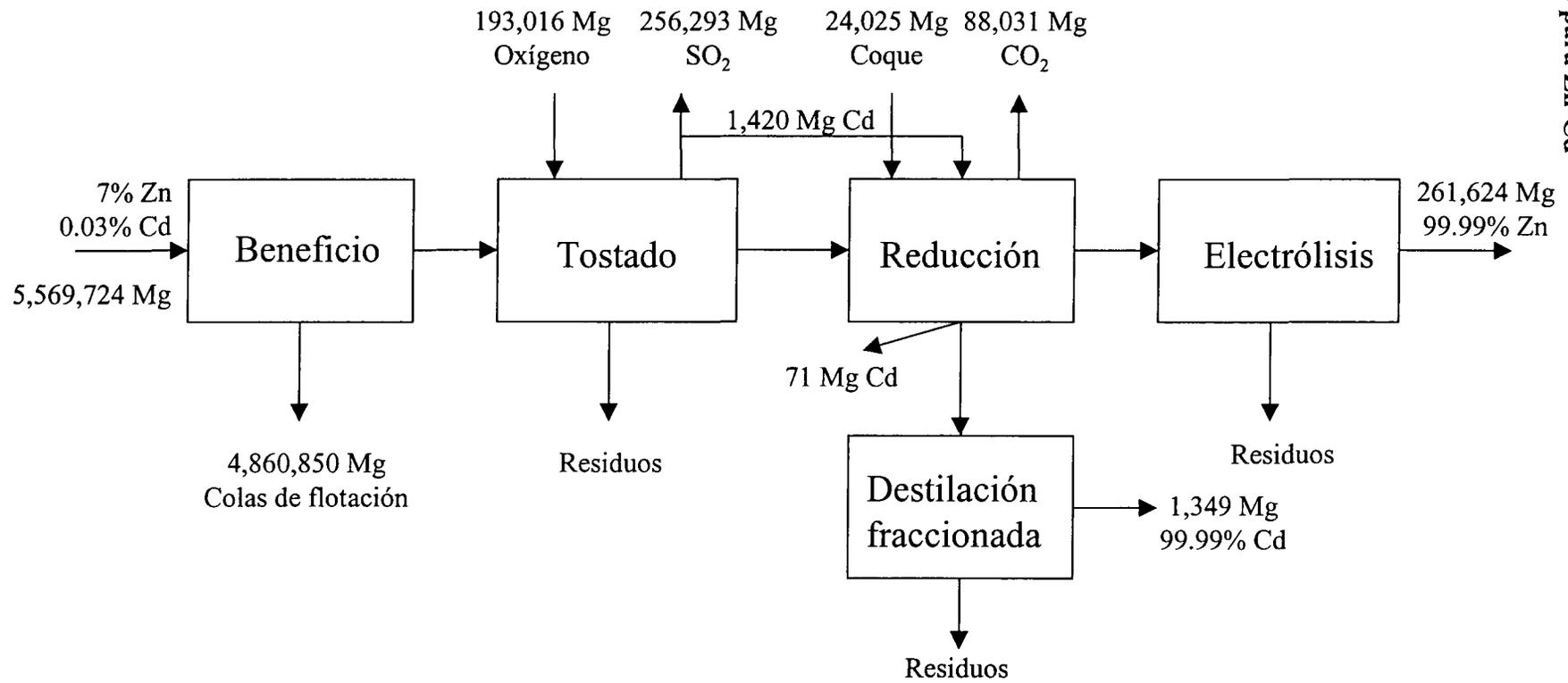


Figura 4.15.3 Diagrama de proceso global para Zn-Cd



## Capítulo 5

### Discusión de resultados

#### 5.1 Resumen de resultados

A continuación se presenta un resumen de los indicadores de ecoeficiencia obtenidos en la investigación para los diferentes minerales. En la Tabla 5.1.1 se mencionan los indicadores de uso de ecoeficiencia de materiales y de valor de producción por uso de materia prima, en la Tabla 5.1.2 están los indicadores de cambio climático, referenciado a emisiones de CO<sub>2</sub> y de valor de producción por emisión de CO<sub>2</sub>, mientras que en la Tabla 5.1.3 se observan los indicadores de dispersión de tóxicos, medidos como emisiones de SO<sub>2</sub> y de valor de producción por emisión de SO<sub>2</sub>.

Lugar	Mineral	Uso de materiales	Mineral	\$ por uso de materiales
1	Sal	88.061% Mg/Mg	Grafito	207.91 \$/Mg
2	Grafito	80.000% Mg/Mg	Pb-Bi-Ag-Au	52.24 \$/Mg
3	Cemento	60.000% Mg/Mg	Cemento	46.41 \$/Mg
4	Barita	48.701% Mg/Mg	Zn-Cd	44.45 \$/Mg
5	Celestita	43.582% Mg/Mg	Zinc	44.36 \$/Mg
6	Fluorita	37.317% Mg/Mg	Fluorita	40.24 \$/Mg
7	Zn-Cd	4.545% Mg/Mg	Celestita	36.42 \$/Mg
8	Zinc	4.521% Mg/Mg	Plomo	22.88 \$/Mg
9	Pb-Bi-Ag-Au	4.478% Mg/Mg	Plata	22.44 \$/Mg
10	Plomo	4.447% Mg/Mg	Sal	19.87 \$/Mg
11	Cu-Mo	0.500% Mg/Mg	Barita	11.77 \$/Mg
12	Cobre	0.492% Mg/Mg	Cu-Mo	8.54 \$/Mg
13	Cadmio	0.023% Mg/Mg	Cobre	8.02 \$/Mg
14	Bismuto	0.016% Mg/Mg	Oro	5.62 \$/Mg
15	Plata	0.015% Mg/Mg	Bismuto	1.31 \$/Mg
16	Molibdeno	0.008% Mg/Mg	Molibdeno	0.52 \$/Mg
17	Oro	0.00006% Mg/Mg	Cadmio	0.09 \$/Mg

**Tabla 5.1.1** Índices de ecoeficiencia de uso de materiales

Los indicadores de ecoeficiencia de materiales son de acuerdo a lo esperado por los valores de concentración a los que se encuentra el mineral en la naturaleza, por lo que minerales que no requieren un alto grado de separación como la sal, el grafito y el cemento, son más ecoeficientes que aquellos que se encuentren a muy baja concentración, como los metales preciosos y el molibdeno. Por otro lado, si se incorpora el factor económico a este indicador, se observa que en vez de la sal figura el zinc, cuyo precio es mucho más atractivo a los inversionistas, aunque esto conlleve una menor eficiencia de materiales. En la parte baja de la tabla, se tienen 3 minerales “subproductos” de los procesos principales (bismuto, molibdeno y cadmio) que son aprovechados ya sea para maximizar el valor económico del proceso principal, o sencillamente en el caso del cadmio porque el no aprovecharlos acarrea un impacto ambiental que puede rebasar la normatividad existente. También llama la atención que el proceso conjunto Pb-Bi-Ag-Au ocupa de manera global la segunda posición, superando a los minerales no metálicos, y de esta manera rebasa al proceso del zinc en el indicador de valor de producción por uso de materiales.

En los indicadores de cambio climático, tres de los minerales no tienen emisiones significativas, por lo que tienen el mejor lugar de eficiencia. De los minerales cuyos procesos sí emiten CO<sub>2</sub>, destacan el oro, cadmio y plata, cuya baja producción a la vez que participan en un proceso contaminante les reduce su ecoeficiencia. Agregando el valor económico, se observa que el plomo, plata y zinc aportan el mayor flujo de efectivo por cada emisión de CO<sub>2</sub>. De lo anterior, se puede concluir que las empresas dedicadas a producir estos metales tienen mayor capacidad económica para “pagar” por sus emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual debería ser aprovechado por la normatividad para tener una mayor exigencia de cumplimiento a las empresas de este ramo. Aquellos que salen ubicados en la parte baja de la tabla, no significa que su cumplimiento de la normatividad deba ser más laxo, sino que los industriales de estos ramos deben cuestionar si sus procesos “soportan” las cada vez más fuertes exigencias de la normatividad ambiental a cambio de una baja remuneración económica, por lo que podría resultar por consecuencia en el cierre de las empresas más contaminantes.

Lugar	Mineral	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Mineral	\$ por emisión de CO <sub>2</sub>
1	Sal	-	Sal	-
1	Grafito	-	Grafito	-
1	Fluorita	-	Fluorita	-
1	Cobre	-	Cobre	-
1	Molibdeno	-	Molibdeno	-
1	Cu-Mo	-	Cu-Mo	-
7	Pb-Bi-Ag-Au	9.481 Mg/Mg	Pb-Bi-Ag-Au	11,061.72 \$/Mg
8	Plomo	9.416 Mg/Mg	Plomo	4,843.72 \$/Mg
9	Zn-Cd	2.987 Mg/Mg	Plata	4,750.37 \$/Mg
10	Zinc	2.972 Mg/Mg	Zn-Cd	2,921.36 \$/Mg
11	Barita	2.652 Mg/Mg	Zinc	2,915.20 \$/Mg
12	Celestita	1.677 Mg/Mg	Oro	1,189.47 \$/Mg
13	Cemento	1.500 Mg/Mg	Bismuto	278.15 \$/Mg
14	Bismuto	0.034 Mg/Mg	Celestita	140.15 \$/Mg
15	Plata	0.031 Mg/Mg	Cemento	116.04 \$/Mg
16	Cadmio	0.015 Mg/Mg	Barita	64.06 \$/Mg
17	Oro	0.00013 Mg/Mg	Cadmio	6.16 \$/Mg

**Tabla 5.1.2** Índices de ecoeficiencia de cambio climático

Por último, en los índices de dispersión de tóxicos se presentan resultados un tanto similares a los obtenidos para cambio climático. Encabezan la lista aquellos minerales que no tienen emisiones de SO<sub>2</sub>, mientras que los más contaminantes son los de menor producción como el cadmio y oro. Mientras tanto, con el factor de valor económico se puede observar que aquellos metales cuyos flujos económicos son mayores como el cobre, plomo y la plata, reeditúan más económicamente por emisión de tóxicos del proceso. En el fondo de la tabla están el molibdeno y bismuto, y finalmente aparece el cadmio como un metal de bajo flujo económico para las empresas, pero con cierto impacto ambiental en los procesos donde participa. También es de señalar que si bien en el flujo económico el cobre es el metal mejor ubicado, al realizarse las comparaciones de los procesos globales, el de

Pb-Bi-Ag-Au tiene un mejor índice que el de Cu-Mo, principalmente debido a la aportación económica de las minas de plomo-plata.

Lugar	Mineral	Emisiones de SO <sub>2</sub>	Mineral	\$ por emisión de SO <sub>2</sub>
1	Barita	-	Barita	-
1	Celestita	-	Celestita	-
1	Sal	-	Sal	-
1	Grafito	-	Grafito	-
1	Fluorita	-	Fluorita	-
1	Cemento	-	Cemento	-
7	Pb-Bi-Ag-Au	3.257 Mg/Mg	Pb-Bi-Ag-Au	3,799.44 \$/Mg
8	Plomo	3.234 Mg/Mg	Cu-Mo	3,444.26 \$/Mg
9	Cu-Mo	2.018 Mg/Mg	Cobre	3,235.62 \$/Mg
10	Cobre	1.984 Mg/Mg	Plomo	1,663.71 \$/Mg
11	Zn-Cd	1.026 Mg/Mg	Plata	1,631.64 \$/Mg
12	Zinc	1.021 Mg/Mg	Zn-Cd	1,003.42 \$/Mg
13	Molibdeno	0.034 Mg/Mg	Zinc	1,001.30 \$/Mg
14	Bismuto	0.012 Mg/Mg	Oro	408.56 \$/Mg
15	Plata	0.011 Mg/Mg	Molibdeno	208.63 \$/Mg
16	Cadmio	0.005 Mg/Mg	Bismuto	95.54 \$/Mg
17	Oro	0.00004 Mg/Mg	Cadmio	2.12 \$/Mg

**Tabla 5.1.3** Índices de ecoeficiencia de dispersión de tóxicos

## 5.2 Aplicación de resultados

Es de interés de este trabajo comentar sobre posibles aplicaciones de los índices obtenidos y cuáles son posibles escenarios de la minería nacional.

- El aprovechamiento de minas con combinación de metales tiene un mejor índice de ecoeficiencia que el de minerales por separado, y si bien puede representar un aumento en equipos de separación necesarios para purificar el metal, el proceso puede ser más redituable. Esto se observa con el proceso Pb-Bi-Ag-Au, el cual aunque los metales por separado tienen índices económicos a nivel medio, si se

unen tienen mejores resultados. De esta manera se puede comprender como en ocasiones es preferible explotar una mina con varios minerales en vez de minas de metales puros, en donde solamente es redituable encontrar yacimientos de concentración mayor al promedio, lo cual es cada vez menos común.

- La situación general del mercado de metales se encuentra deprimida y los años de “bajo precio” si fueran eliminados no afectarían mucho los resultados. Si se considerara solamente el precio máximo de los últimos 5 años para los metales en vez del precio promedio, no existen cambios significativos y los metales quedan situados en la misma posición en los índices de valor de producción.
- Es importante también observar en los metales por obtención secundaria cuál es la producción resultante de tomar esta opción y comparar esta cifra con la producción real de México. De lo anterior, se observa lo siguiente
  - El promedio de producción de bismuto de 1998 a 2002 es 1,023 Mg, contra 514 Mg de los cálculos. Este número proviene de la bibliografía de Merritt utilizando un ejemplo de la refinería de Peñoles en Torreón, por lo que en comparación con la producción real y considerando que el bismuto solamente se obtiene como subproducto, se puede concluir que la concentración real pudiera ser mayor al 0.37% reportado en este caso. Para que los cálculos coincidieran con la producción real, el promedio de bismuto en el concentrado de plomo debiera ser 0.704%, lo cual es plausible si el bullion tiene menos impurezas como Sb, As, Cu, etc.
  - El promedio de producción de oro entre 1998 y 2002 es de 24.2 Mg, contra 1.8 Mg de los cálculos. Esta diferencia puede deberse a que en México todavía se aprovecha oro vía primaria y estas minas aportan mayor producción. Para que los datos fueran iguales, la concentración de oro en la mina debiera ser de 7.7 g/ton, dato muy por encima del promedio reportado por el Instituto de Minería y Metalurgia en Inglaterra de 0.6 g/ton.
  - El promedio de producción de plata refinada entre 1998 y 2002 es de 2,016 Mg contra 467 de los cálculos. Como ya comentó, la plata se obtiene aproximadamente 50% vía primaria y el resto secundaria (no solamente se aprovecharía plata de minas de plomo, sino de otros metales), por lo de aquí

viene una aportación importante de producto de minas primarias, las cuales lógicamente tienen una concentración mayor de metal que hacen atractiva la explotación de la mina sin tener la obtención de otros metales como plomo, como por ejemplo en Guanajuato, la mina de las Torres reporta 230 g/ton. Sin embargo, este tipo de minas están más expuestas al agotamiento del metal y su abandono por resultar incosteable una vez aprovechada la mina de metales preciosos, y en realidad esto sucedió el año pasado y Peñoles anunció el cierre de operaciones en esta mina.

- En el caso del molibdeno, ya se comentó en su desarrollo que la concentración de metal en la mena del cobre tuvo que utilizarse un dato ligeramente más pequeño al menor reportado en la literatura, concluyendo que el contenido de molibdeno en la mena de cobre en México es de menor calidad a la de otros países como Chile, USA o Canadá.
- Finalmente, en el caso del cadmio, la producción promedio de refinado entre 1998 y 2002 es de 1,276 Mg, contra 1,349 Mg de los cálculos. En este metal los cálculos se basaron en tomar el dato medio de la concentración típica de cadmio en la esfalerita o menas de zinc, que es un rango entre 0.01% y 0.05%, siendo el valor medio 0.03%. Para que la producción y los cálculos coincidieran, el valor de cadmio en la mena debiera ser 0.023%, el cual queda dentro del rango típico, aunque también pudiera deberse esta menor producción a mayores emisiones de cadmio contenido en el SO<sub>2</sub> producto del tostado de la esfalerita.

## Capítulo 6

### Conclusiones

La investigación arrojó varios resultados que permiten conocer los diferentes desempeños de los procesos en la minería y realizar una comparación entre ellos con el fin de detectar cuáles minerales tienen áreas de oportunidad en cuanto a sus índices de ecoeficiencia. En la medida en que se tengan indicadores de este tipo, se podrán determinar objetivos de mejora en el desempeño, y si estos objetivos no son alcanzables, será conveniente reevaluar si el proceso total es necesario, o si no existe algún sustituto no sólo en tecnología, sino en el material en cuestión, de tal modo que los materiales que se estén utilizando en los procesos productivos cada vez aseguren mejor el logro del desarrollo sostenible de las comunidades. Los minerales no metálicos tienen valores más altos en el índice de ecoeficiencia de materiales que los metales preciosos y los no ferrosos debido a su mayor concentración inicial y a que en algunos no es necesario lograr una pureza mayor al 99%, mientras que los metales ninguno tuvo un índice mayor al 5% y la pureza que se requiere es más alta que los minerales industriales. En el índice de valor de producción también por uso de materiales solamente el zinc, plomo y la plata logran competir con los minerales no metálicos, mientras que el resto de los metales tiene valores menores a \$10 dólares por tonelada de materia prima.

Por el contrario, en los índices de contribución al cambio climático, tanto en masa como en valor de producción, si bien hay minerales no metálicos que no tienen este tipo de emisiones, aquellos que sí las tienen presentan un menor desempeño que la mayoría de los metales, con la excepción permanente del cadmio que ocupa generalmente la última posición, y es que el mayor precio y mayor producción de los metales supera fácilmente al cemento, barita y celestita.

Finalmente, en los índices de dispersión de tóxicos, dado que ninguno de los minerales no metálicos tiene emisiones significativas, la comparación se da solamente entre los metales no ferrosos y los preciosos, que se obtienen vía primaria o secundaria. De ahí, se desprende que el proceso de Pb-Bi-Ag-Au tiene un mejor desempeño, seguido del Cu-Mo y en último lugar el Zn-Cd. Se hace la observación que en los tres tipos de índices, la plata representa una aportación muy valiosa al proceso del plomo, ya que la combinación precio-producción

logra casi empatar al plomo que es bajo precio y alta producción. Resulta interesante conocer que la plata sea la que incline la balanza hacia el mejor índice de ecoeficiencia del proceso Pb-Bi-Ag-Au. Se pudiera concluir que las minas de plomo si bien son valiosas por sí mismas, si no pueden ser aprovechadas de otro mineral como puede ser la plata, no representan una opción tan atractiva de aprovechamiento.

En general, se encontró que los índices de ecoeficiencia aquí descritos varían principalmente dependiendo de: la concentración del mineral en la mena, la eficiencia en las operaciones de separación y purificación de los minerales, así como de la presencia de contaminantes ya sea presentes o que son producto de las operaciones unitarias, e inclusive dependen de factores externos como es el valor económico internacional del mineral. De aquí que un posible camino para optimizar un proceso ecoeficiente puede basarse en acciones como aumentar la eficiencia de purificación y recuperación de metales mediante nueva tecnología, reducción de contaminantes mediante equipo apropiado, o inclusive aumentar el requerimiento mínimo de concentración en la materia prima.

La realización de este trabajo se topó con uno de los síndromes propios de la falta de cultura de las instituciones, tanto públicas como privadas, y que irónicamente también se refleja en la falla del logro del desarrollo sostenible: la falta de información. En algunos casos ante la falta de datos reportados en literatura, se realizaban suposiciones de eficiencias altas en los procesos de separación, por ejemplo, por lo que hubiera sido de gran ayuda el contar en ocasiones con valores típicos en las eficiencias de algunas operaciones, así como pérdidas de metales por emisiones al ambiente. Desafortunadamente, en México todavía existen muchas barreras para el flujo de información entre diferentes componentes de la sociedad. Prevalece una cultura que mira con reserva el compartir información, tal vez por sentir que el transmitir el conocimiento a otra persona equivale a un acto casi suicida con fecha indefinida, porque eventualmente, esa otra institución utilizará la información en perjuicio del transmisor. Resulta interesante que a final de cuentas mucho del estancamiento en las reformas de forma y fondo de un país se ven detenidas por la desconfianza, factor que ha sido objeto de análisis de muchos historiadores, pero que aparentemente algunos líderes de opinión no toman en cuenta para tomar decisiones que reflejen una visión a largo plazo.

En este trabajo, la falta de información completa sobre los procesos, como lo es conocer las eficiencias de las operaciones de separación de metales, o tener mayores datos sobre concentraciones promedio de menas, y también por qué no, sobre otros contaminantes que puedan ser convertidos a emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, ponen un grado de incertidumbre al cálculo final del índice de ecoeficiencia. Particularmente en este sentido, la precisión en los resultados pudiera ser más acotada si información como cantidad de combustibles utilizados, o emisiones producidas, fueran información pública. En teoría, esta información forma parte de la Licencia Ambiental de las empresas y es responsabilidad de la Semarnat la recopilación y seguimiento de estos trámites. Pero la institución gubernamental se ve rebasada ante la cantidad de trámites que ella misma exige, y en donde la incertidumbre anual propia del presupuesto impide trabajar en proyectos de largo plazo. Habría que cuestionar la validez y conveniencia de un organismo ambiental autosuficiente con capacidad regulatoria y coordinadora del proyecto ambiental nacional.

La información contenida en este trabajo puede ser de utilidad para el interesado en realizar comparaciones entre su propio proyecto y los valores típicos o reportados. Si se tiene la concentración de materiales de una mena, pueden sustituirse los datos aquí reportados y observar cuáles serían los dividendos por unidad de contaminante generada. Inclusive, el usuario experimentado que tiene información de costos de equipos e insumos, puede hacer un análisis de ingresos potenciales contra inversión necesaria para realizar el proceso, contando inclusive con la posibilidad de seleccionar el equipo que más le convenga dependiendo de lo que esté buscando, como puede ser reducir emisiones o reducir uso de materiales, etc, es decir escoger qué criterio de reingeniería de procesos quiere aplicar.

Otros beneficios que aporta el cálculo de índices de ecoeficiencia es que permiten fijar objetivos de desempeño a largo plazo, lo cual aumenta el grado de compromiso interno para su cumplimiento y manifiesta públicamente la visión de la compañía sobre su impacto ecológico. Así también, los índices permiten tomar una fotografía del estado actual de desempeño de los procesos productivos de una compañía, lo que sienta una base para la implementación de un sistema de administración ambiental.

Debido a la limitación del alcance de este trabajo, no se consideró profundizar en la caracterización de las corrientes residuales de los procesos de la minería, información indudablemente interesante y que permitiría aún más conocer el impacto ambiental

generado por la realización de un producto minero. Un posible trabajo futuro pudiera ser el analizar en algún proceso seleccionado, cuál es por ejemplo, el índice de ecotoxicidad del aprovechamiento del metal. Se podría realizar una investigación ya sea en literatura o en campo preferentemente sobre cuál es la calidad de los residuos generados en un proceso, desde la flotación del mineral hasta la purificación y generación de emisiones al ambiente, y cuál es la disposición final que tiene cada residuo.

La ecoeficiencia no es suficiente en sí misma ya que solamente involucra únicamente dos (economía y ecología) de los tres elementos del desarrollo sostenible, dejando de lado el desarrollo social de las comunidades y naciones, cuestión que todavía tiene mucho por desarrollar. Las empresas tienen por principal objetivo el crear negocio para sus accionistas y satisfacer las necesidades de los consumidores, pero es importante también que busquen mantener y mejorar la calidad de vida de la comunidad, lo que finalmente redundará en la sustentabilidad del ecosistema. Ésta sólo podrá lograrse procurando que las empresas, los gobiernos, y agentes externos con intereses, compartan la responsabilidad de un desarrollo sostenible.

El primer paso para avanzar en el camino del desarrollo sostenible es definir claramente qué se desea mejorar y a qué niveles se desea llegar. Lo anterior implica necesariamente seleccionar una variable que sea cuantificable y se considere que es actual o potencialmente peligrosa para el equilibrio ecológico-económico-social, y fijar un objetivo que sea real y que garantice un mejor nivel de vida. Una muestra muy clara es el Protocolo de Kyoto, en el que se especifica qué emisiones deben reducirse y a qué objetivo debe llegarse. Lamentablemente ha faltado el apoyo político y el compromiso de algunas naciones industrializadas para concretar lo que alguna vez ya había sido acordado.

Para bien o para mal, se requiere que el esfuerzo sea a nivel global, y no solamente hechos aislados por regiones. Hoy más que nunca se requiere la visión del estadista, del líder que no piensa en los resultados a corto plazo y las encuestas de popularidad, sino en los grandes proyectos que, aunque casi siempre requieren enorme trabajo de cabildeo y negociaciones estratégicas entre diferentes puntos de vista, implican reformas estructurales y provocan los cambios de gran magnitud que traerán beneficios a las siguientes generaciones.

Un ejemplo de acciones de gobierno encaminadas a la búsqueda del desarrollo sostenible se está gestando en Chile, país eminentemente minero (World Market Analysis, 2004). El

Gobierno actual acaba de hacer una alianza con su principal opositor y contrario ideológicamente, para establecer un impuesto especial a las compañías mineras, de tal manera que fiscalice las utilidades de las compañías que explotan recursos no renovables, pero en donde sea claramente señalado que la recaudación irá destinada a combatir la pobreza y creciente desigualdad entre la sociedad chilena. Aunque existe oposición de las corporaciones, quienes argumentan que el país perderá la ventaja competitiva que posee al ser un lugar de impuesto sobre la renta menor al promedio mundial (20% en vez del 36% global), la coalición busca remediar la creciente inestabilidad social debido a la mala distribución de la riqueza, y lo cual a la larga constituye una amenaza potencial para todos los sectores del país y que pudiera ser aprovechada por algunos políticos en beneficio de sus propios intereses, como ya ha sucedido en otros países de América Latina.

A lo largo de este trabajo, en estadísticas de producción de países y particularmente para el caso de México, se observó el papel que puede desempeñar la minería en la riqueza de las naciones y la afectación que tiene en los problemas sociales y ecológicos. Desafortunadamente se observa que el panorama actual de las corporaciones mineras es incierto por todos los ámbitos; enfrentan serios problemas económicos por la caída de precios y la recesión a nivel mundial que se vive actualmente, hay inestabilidad social por la historia de accidentes, daños a la vida y salud de las personas, que marcan a las empresas mineras como corporaciones que aparentemente no están cumpliendo sus obligaciones con las regulaciones, y finalmente con el impacto ecológico por la todavía gran falta de cultura de respeto al medio ambiente y la incomprensión de los beneficios de invertir en mejoras de reingeniería a los procesos productivos. En todo lo anterior, el uso de indicadores, no sólo facilita, sino que se vuelve indispensable para determinar si los procesos están enfocados al desarrollo sostenible y permiten garantizar una mayor calidad de vida para la sociedad.

Sin embargo, las empresas del ramo minero todavía tienen mucho que avanzar en camino al desarrollo sostenible. Pareciera que la cultura de utilizar procesos antiguos en la fabricación de sus productos se refleja en la rapidez para responder ante los cambios que la globalización y el desarrollo sostenible demandan. Luego entonces, aunque las empresas realizan esfuerzos para disminuir el impacto ambiental que tienen en las comunidades, deben ser capaces de realizar una adecuada comunicación con la sociedad y demostrar que tienen la habilidad no sólo de cumplir con los requerimientos mínimos, sino traer un

auténtico beneficio a sus comunidades. Es necesario que las corporaciones mineras sean partícipes de organismos internacionales y de foros de cooperación encaminados al desarrollo sostenible, tal que muestren el compromiso de las empresas del ramo en el cumplimiento de los grandes objetivos ambientales que son acordados y que deben ser respetados internacionalmente.

La confianza entre las naciones es indispensable para el crecimiento y desarrollo de las comunidades. El intercambio de información será el reflejo de una sociedad que reconozca que caminando juntos hacia objetivos comunes es un paso esencial en el logro de una meta común para todos: el desarrollo sostenible.

## **Apéndices**

A continuación se anexa en forma impresa las hojas de cálculo realizadas para la elaboración de los indicadores. Los datos utilizados para dichos cálculos pueden ser consultados en las referencias bibliográficas antes mencionadas.



Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
SrSO <sub>4</sub>	88.00%	137,962.99	156,776	→	145,224.20	SrSO <sub>4</sub>	95.00%	137,962.99

11,552 Residuos

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
SrSO <sub>4</sub>	95.00%	137,962.99	145,224.2	→	97,157.0	SrS	92.53%	89,895.79
			156,005.84					
			156,005.84					

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 79,607.26

Mezclado

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
SrS	92.53%	89,895.79	97,157		113,146	SrCO <sub>3</sub>	98.0%	110,882.94
						BaCO <sub>3</sub>	1.0%	1,131.46
						CaCO <sub>3</sub>	1.0%	1,131.46

58,620 Na<sub>2</sub>S

4,998 Residuos

Índice de Ecoeficiencia de materiales	Emisiones CO <sub>2</sub>	Emisiones SO <sub>2</sub>	\$ mineral por MP	\$/ CO <sub>2</sub>
43.58%	1.677	0.0000	36.42	140.15

Aprovechamiento

Material	Concentración	Masa
BaSO <sub>4</sub>	88.80%	193,993.68
SiO <sub>2</sub>	9.20%	20,098.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50%	1,092.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50%	3,276.92

Flujo entrada  
218,461



29,722 Agentes de flotación (Mg)

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
175,333	BaSO <sub>4</sub>	94.60%	165,864.60
	SiO <sub>2</sub>	1.50%	2,629.99
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00%	1,753.33
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00%	1,753.33

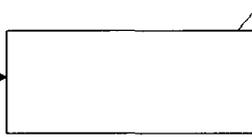
72,850 Residuos  
28,129 BaSO<sub>4</sub>

Reacción

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 75,322 62,551.72 CO<sub>2</sub>  
C 17,071.71

Material	Concentración	Masa
BaSO <sub>4</sub>	94.60%	165,864.60
SiO <sub>2</sub>	1.50%	2,629.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00%	1,753.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00%	1,753.33

Flujo entrada  
175,333



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
141,659	BaCO <sub>3</sub>	99.00%	140,242.12
	SrO	1.00%	1,416.59

258,258.76 55,465 Na<sub>2</sub>S  
258,258.76 8,051 Residuos

Índice de Ecoeficiencia de materiales  
48.70%

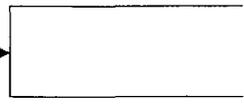
Emisiones CO<sub>2</sub>  
2.652

Emisiones SO<sub>2</sub>  
0.0000

\$ mineral por MP  
11.77

\$ / CO<sub>2</sub>  
64.06

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Grafito	80.00%	25,065.82	31,332
Cuarzo, mica	20.00%	6,266.46	



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
30,200	Grafito	83.00%	25,065.82
	Cuarzo, mica	17.00%	5,133.96

1,132 Residuos

Flotación

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Grafito	83.00%	25,065.82	30,200
Cuarzo, mica	17.00%	5,133.96	



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
29,489	Grafito	85.00%	25,065.82
	Cuarzo, mica	15.00%	4,423.38

711 Residuos

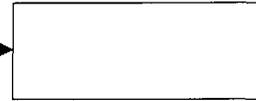
Índice de Ecoeficiencia de materiales  
80.00%

\$ mineral por MP  
207.91

Método 1, grado metalúrgico  
Denver flowsheets

Material	Concentración	Masa
CaF <sub>2</sub>	32.00%	343,547.95
SiO <sub>2</sub>	1.00%	10,735.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.00%	21,471.75
CaCO <sub>3</sub>	65.00%	697,831.77

Flujo entrada  
1,073,587



782,318 Residuos  
75,581 CaF<sub>2</sub>  
4,910 SiO<sub>2</sub>  
18,559 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
683,268 CaCO<sub>3</sub>  
3,379 Agentes de flotación

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
291,269	CaF <sub>2</sub>	92.00%	267,967.40
	SiO <sub>2</sub>	2.00%	5,825.38
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00%	2,912.69
	CaCO <sub>3</sub>	5.00%	14,563

Índice de Ecoeficiencia de materiales  
27.05%

\$ mineral por MP  
23.45

1,661 Agentes de flotación

Método 2, grado ácido  
Denver flowsheets

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
CaF <sub>2</sub>	72.00%	405,632.47	563,378
SiO <sub>2</sub>	7.00%	5,825	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.50%	2,913	
CaCO <sub>3</sub>	7.50%	14,563	

Flujo entrada  
563,378

206,086 Residuos  
60,844.87 CaF<sub>2</sub>  
2,967 SiO<sub>2</sub>  
54 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
7,775 CaCO<sub>3</sub>  
1,661 Agentes

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
357,293	CaF <sub>2</sub>	96.50%	344,787.60
	SiO <sub>2</sub>	0.80%	2,858.34
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80%	2,858.34
	CaCO <sub>3</sub>	1.90%	6,788.56

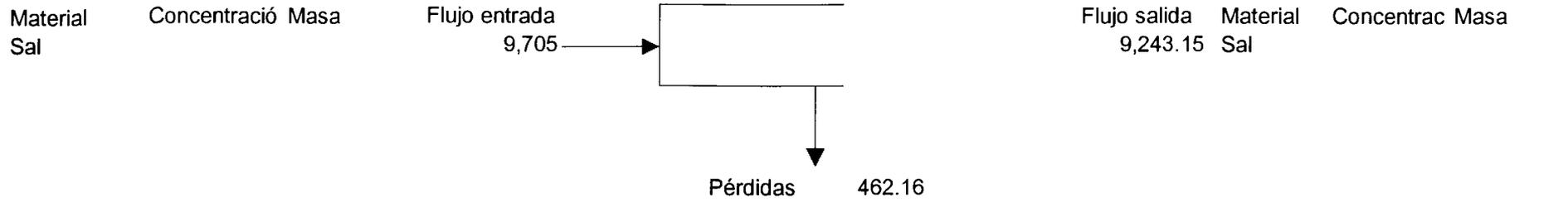
Índice de Ecoeficiencia de materiales  
63.23%

\$ mineral por MP  
72.25

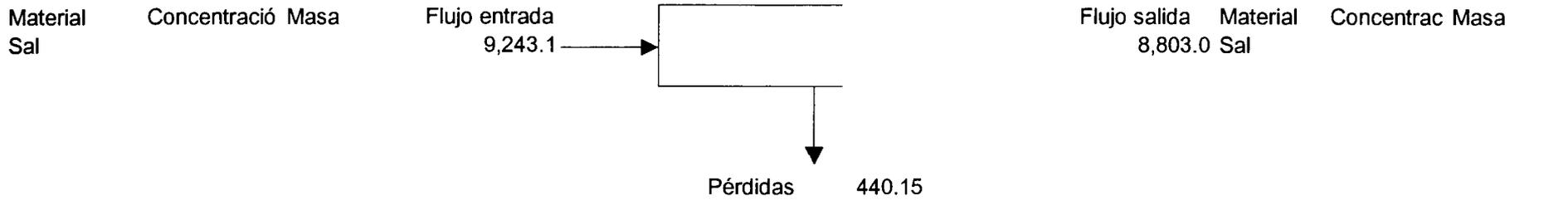
Para los dos procesos

Índice de Ecoeficiencia de materiales  
37.32%

\$ mineral por MP  
40.24



Refinación



Empacado



Pérdidas Residuos

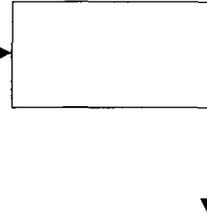
Índice de Ecoeficiencia de materiales  
88.06%

\$ mineral por MP  
19.87

**Beneficio CEMENTO**

Material	Concentració	Masa
Calizas	87.08%	41,958.4
Silíceas	5.68%	2,735.9
Aluminosas	6.26%	3,015.4
Ferrosas	0.99%	476.4

Flujo entrada  
48,183



Flujo salida	Material	Concentrac	Masa
48,183	CaO	87.08%	41,958.4
	SiO <sub>2</sub>	5.68%	2,735.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.26%	3,015.4
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.99%	476.4

**Piroprocesado**

Material	Concentració	Masa
CaO	87.08%	41,958.4
SiO <sub>2</sub>	5.68%	2,735.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.26%	3,015.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.99%	476.4

Flujo entrada  
48,183



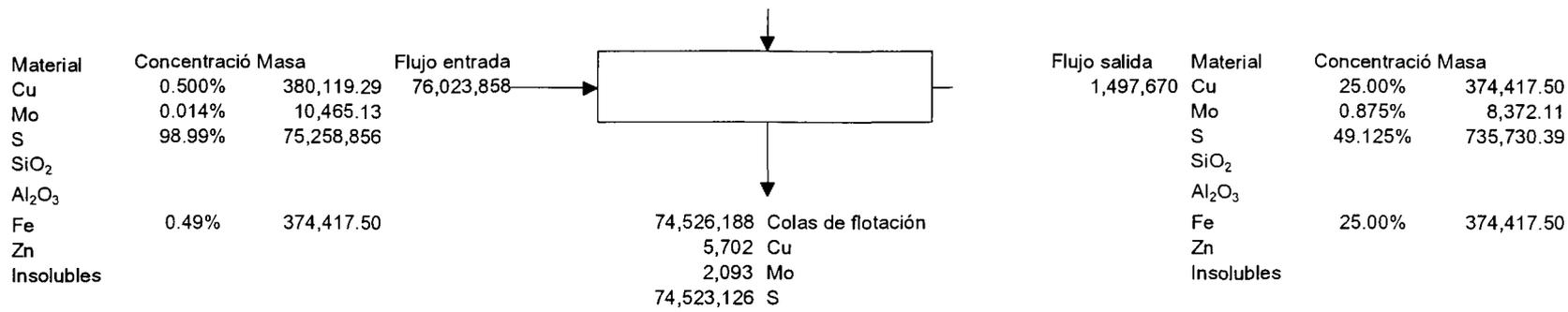
Flujo salida	Material	Concentrac	Masa
28,343	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	55.00%	15,588.6
	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	24.00%	6,802.3
	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	10.00%	2,834.3
	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	11.00%	3,117.7

**Empacado**

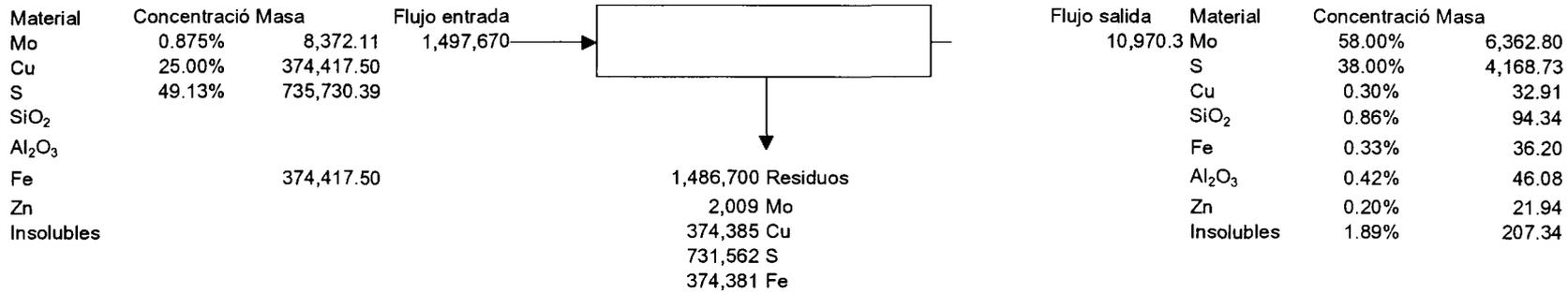
1,417.1 CaSO<sub>4</sub>

Material	Concentració	Masa	Flujo entrada
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	55.0%	15,588.6	28,343
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	24.0%	6,802.3	
Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	10.0%	2,834.3	
Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	11.0%	3,117.7	

Flujo salida	Material	Concentrac	Masa
29,760	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	52.4%	15,588.6
	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	22.9%	6,802.3
	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	9.5%	2,834.3
	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	10.5%	3,117.7
	CaSO <sub>4</sub>	4.8%	1,417.1



**Flotación del molibdeno**



**Cobre ampollado**

Escorias  
O<sub>2</sub> 94,259 188,718 SO<sub>2</sub>  
Fundentes



**Electrólisis**



Índice de Ecoeficiencia de materiales	Emisiones CO <sub>2</sub>	Emisiones SO <sub>2</sub>	\$ mineral por MP	\$ / CO <sub>2</sub>	\$ / SO <sub>2</sub>
0.5002%	0.00	2.018	8.54	0	3,444.26



Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
ZnS	7.00%	389,880.69	5,569,724		708,874	ZnS	55.00%	389,880.69
Zn	7.00%	389,881				Zn	55.00%	389,881
S	92.16%	5,133,057.78				S	44.80%	317,573
Cd	0.03%	1,670.92	0.023%			Cd	0.20%	1,420.28
Pb	0.42%				4,860,850 Residuos	Pb		
Fe					251 Cd	Fe		
Cu	0.39%					Cu		

			O <sub>2</sub>	192,016	1,420.28 Cd
Tostado					256,293.27 SO <sub>2</sub>

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
ZnS	55.00%	389,880.69	708,874		383,063	ZnO	85.00%	325,603.34
Zn	55.00%	389,881				Zn	80.34%	261,598.04
S	44.80%	317,573				O	19.66%	64,005.31
Cd	0.20%	1,420.28				Pb		
Pb						Fe		
Fe						Cu		
Cu								

			Cd	1,420.28	
Reducción			C	24,025.49	88,030.80 CO <sub>2</sub>

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
ZnO	85.00%	325,603.34	383,063		307,762	Zinc	85.00%	261,598.04
Zn	80.34%	261,598.04				Zn	85.00%	261,598.04
O	19.66%	64,005.31				Pb		-
Pb		0				Fe		
Fe						Cd		1,420.28
Cu						Cu		

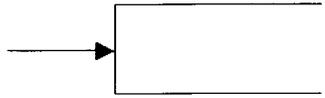
Horno			C	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	CO <sub>2</sub>
-------	--	--	---	----------	----------	-----------------

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada		Flujo salida	Material	Concentración	Masa
CdO			307,762			Cd		1,349.27
Cd		1,420.28						
O								

71.0 Cd

Destilación fraccionada

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Cadmio		1,349.27	#¡DIV/0!

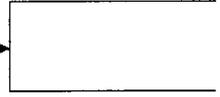


Flujo salida	Material	Concentración	Masa
1,349.4	Cadmio	99.99%	1,349.27
	Plomo	0.05%	0.6747
	Cobre	0.03%	0.3374
	Plata	0.03%	0.3374

#¡DIV/0! Residuos

Electrólisis

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Zinc	85.00%	261,598.04	307,762
Pb			
Fe			
Cd			
Cu			



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
261,624	Zinc	99.99%	261,598.04
	Plomo	0.003%	-
	Fierro	0.003%	-
	Cadmio	0.003%	
	Cobre	0.001%	

46,138 Residuos

Índice de Ecoeficiencia de materiales	Emisiones CO <sub>2</sub>	Emisiones SO <sub>2</sub>	\$ mineral por MP	\$ / CO <sub>2</sub>	\$ / SO <sub>2</sub>
4.5447%	2.9870	1.026	44.45	2,921.36	1,003.42
4.521%	2.972	1.021 Zn	44.36	2,915.20	1,001.30
0.023%	0.015	0.005 Cd	0.09	6.16	2.12

upela

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Ag	99.592%	464.67	467
Au	0.404%	1.89	
Pb	0.001%	0.004	
Cu	0.003%	0.014	

0.000 Plomo

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
467	Ag	99.592%	464.67
	Au	0.404%	1.89
Doré	Pb	0.001%	0.0037
	Cu	0.003%	0.014

arting por proceso Moebius

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Ag	99.59%	464.67	467
Au	0.40%	1.8870	
Pb	0.00%	0.0037	
Cu	0.00%	0.0139	

1.8865 Au

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
464.721	Ag	99.99%	464.675
	Pb	0.0008%	0.00372
	Au	0.0001%	0.00046
	Cu	0.003%	0.01394

efinación electrólisis de Wohlwill

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Au	99.99%	1.8865	1.8867

0.000 Impurezas

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
1.8867	Au	99.99%	1.8865

esbismutización

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Plomo	99.22%	141,526.00	142,643
Pb	0.38%	542.04	
Bi	0.005%	7.08	
Ag	0.316%	451.29	
Fe	0.081%	116.24	

513.73 Bi  
101.63 Ca  
254.08 Mg  
0 Pb  
116.24 Cu  
444.21 Fe

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
141,568	Plomo	99.97%	-
	Pb	99.97%	141,526.00
	Bi	0.02%	28.31
	Ag	0.005%	7.08
	Fe	0.005%	7.08

lorinación

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Bi	6.00%	513.73	8,562.1
Pb		101.632	
Ag		254.080	
Plomo	94.00%	116.24	
Cu		444.21	

Residuos  
MgCl<sub>2</sub> 101.632  
CaCl<sub>2</sub> 254.080  
PbCl<sub>2</sub>  
Cu 116.24  
Fe 444.21

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
2,054.9	Bi	25.00%	513.73
	Pb	0.00%	-
	Cu		0.0015
	Fe		0.0010

efinación

Material	Concentración	Masa	Flujo entrada
Bismuto	25.00%	513.73	2,055
Plomo		0	
Cu		0.0015	
Fe		0.0010	

1,548 Residuos

Flujo salida	Material	Concentración	Masa
514	Bismuto	99.999%	513.73
	Zn	0.0002%	0.0010
	Cu	0.0003%	0.0015
	Fe	0.0002%	0.0010

ndice de Ecoeficiencia de materiales

Emissiones CO<sub>2</sub>  
9.481

Emissiones SO<sub>2</sub>  
3.257

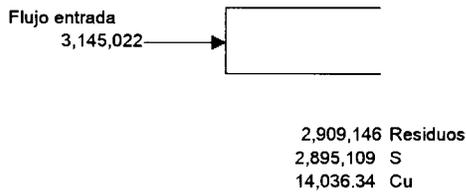
\$ minerales / MP  
52.24

\$ / CO<sub>2</sub>  
11,061.72

\$ / SO<sub>2</sub>  
3,799.44

**Aprovechamiento**

Material	Concentración	Masa
PbS		
Pb	4.50%	141,526
S	94.95%	2,986,288
Bi	0.017%	542
Ag	0.015%	471.75
Au	0.00006%	1.887
Sb	0.050%	1,569
Sn	0.000%	-
As	0.001%	19
Fe	0.014%	451
Cu	0.45%	14,153

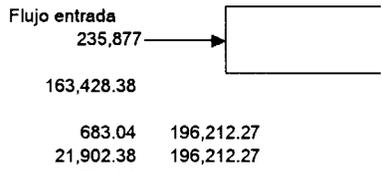


Flujo salida	Material	Concentración	Masa
235,877	PbS		
	Pb	60.00%	141,526.0
	S	38.66%	91,179.11
	Bi	0.23%	542.04
	Ag	0.20%	471.75
	Au	0.0008%	1.887
	Sb	0.67%	1,569.44
	Sn	0.00%	-
	As	0.01%	18.89
	Fe	0.19%	451.29
	Cu	0.05%	116.26

**Sinterizado**

O<sub>2</sub> 32,784 43,758.31 SO<sub>2</sub>

Material	Concentración	Masa
PbS		
Pb	60.00%	141,526.0
S	38.66%	91,179.11
Bi	0.23%	542.04
Ag	0.20%	471.75
Au	0.00%	1.89
Sb	0.67%	1,569.44
Sn	0.00%	-
As	0.01%	18.89
Fe	0.19%	451.29
Cu	0.05%	116.26

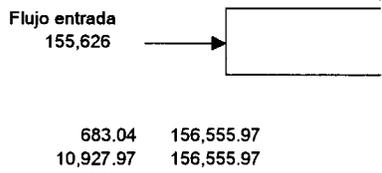


Flujo salida	Material	Concentración	Masa
155,626	PbO		152,453.97
	Pb	90.94%	141,526.00
	O	7.02%	10,927.97
	Bi	0.35%	542.04
	Ag	0.30%	471.75
	Au	0.00%	1.89
	Sb	1.01%	1,569.44
	Sn	0.00%	-
	As	0.01%	18.89
	Fe	0.29%	451.29
	Cu	0.07%	116.26

**Reducción**

C 4,102.00 15,029.97 CO<sub>2</sub>

Material	Concentración	Masa
PbO		152,453.97
Pb	90.94%	141,526.00
O	7.02%	10,927.97
Bi	0.35%	542.04
Ag	0.30%	471.75
Au	0.0012%	1.89
Sb	1.01%	1,569.44
Sn	0.00%	-
As	0.01%	18.89
Fe	0.29%	451.29
Cu	0.07%	116.26



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
145,319	Plomo		141,526.00
	Pb	97.39%	141,526.00
	Bi	0.37%	542.04
	Ag	0.75%	471.75
	Au	0.0020%	1.89
	Sb	1.08%	1,569.44
	Sn	0.00%	-
	As	0.013%	18.89
	Fe	0.31%	451.29
	Cu	0.08%	116.26

**Remoción As-Sb-Sn**

NaNO<sub>3</sub>

Material	Concentración	Masa
PbO		152,453.97
Pb	97.39%	141,526.00
Bi	0.37%	542.04
Ag	0.75%	471.75
Au	0.0020%	1.89
Sb	1.08%	1,569.44
Sn	0.00%	-
As	0.01%	18.89
Fe	0.31%	451.29
Cu	0.08%	116.26

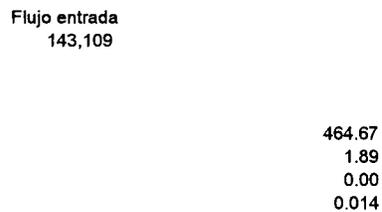


Flujo salida	Material	Concentración	Masa
143,109	Plomo		141,526.00
	Pb	98.89%	141,526.00
	Bi	0.38%	542.04
	Ag	0.33%	471.75
	Au	0.0013%	1.89
	Fe	0.32%	451.29
	Cu	0.08%	116.26

**Proceso Parkes**

Zn

Material	Concentración	Masa
Pb	98.89%	141,526.00
Bi	0.38%	542.04
Ag	0.33%	471.75
Au	0.0013%	1.89
Fe	0.32%	451.29
Cu	0.08%	116.26



Flujo salida	Material	Concentración	Masa
142,643	Pb	99.22%	141,526.00
	Bi	0.38%	542.04
	Ag	0.00%	7.08
	Fe	0.32%	451.29
	Cu	0.08%	116.26

