



Análisis ambiental de la producción de cobre

TESINA DE MÀSTER presenta para obtener el título de Máster Universitario en Ingeniería Geológica y de Minas por la Universidad Politécnica de Catalunya

Tesina de Especialidad

Autor:

Yifei Zhang

Director de Tesina:

Alejandro Josa Garcia-Tornel

Alfonso Rodríguez Dono

Programa de Máster:

ENGINYERIA GEOLÒGICA I DE MINES

RESUMEN

En los últimos veinte años, la industria europea del cobre ha seguido invirtiendo en mejoras tecnológicas que han reducido los impactos ambientales de sus operaciones y su consumo de energía, mientras que al mismo tiempo ha incrementado su capacidad para reciclar más materiales secundarios y chatarra. Además, la mayoría de los concentrados de sulfuros de cobre se tratan actualmente en los complejos de fundición y refinación. Se ha intentado desarrollar un proceso hidrometalúrgico para reemplazar la fundición de cobre en el pasado, pero con muy poco éxito. Análisis de Ciclo de Vida es un método integrado "de la cuna a la tumba" para evaluar comportamiento medioambiental de los productos o servicios. Este estudio está dedicado a los antecedentes históricos y geológicos, las fuentes y la producción de cobre, los usos del cobre, el consumo y la acumulación. Luego obtiene las metodologías que se usan en el estudio y los supuestos y alcance del estudio. Finalmente se hace la comparación de las fuentes de electricidad y de los procesos metalúrgicos, y el análisis de sensibilidad de la ley de cobre a impacto ambiental.

ABSTRACT

Over the past twenty years, the European copper industry has continued to invest in technology improvements that have reduced environmental impacts of its operations and lowers its energy consumption, while at the same time increasing its ability to recycle a broader range of secondary raw materials and scrap. Furthermore, the majority of copper sulphide concentrates produced worldwide are currently treated at smelter/refinery complexes. There have been many attempts to develop a hydrometallurgical process to replace copper smelting in the past, but with very little success. Life Cycle Analysis is an integrated “cradle to grave” approach to assess the environmental performance of products or services. This study is devoted to the historical and geological data, sources and production of copper, the use of copper, etc. Next we describe the methodologies used in this study and its assumptions and scope. Finally we have made the comparison of sources of electricity and metallurgical processes, and sensitivity analysis.

Índice

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
1 Introducci ón.....	1
2 Estado de arte.....	3
2.1 Visi ón global de cobre.....	3
2.1.1 El cobre en la Antig üedad	4
2.1.2 Edad Media y Edad Moderna	5
2.1.3 Edad Contempor ánea.....	6
2.2 Producci ón y comercio	7
2.2.1 Producci ón minera.....	8
2.2.2 Reservas.....	10
2.2.3 Comercio y consumo.....	12
2.2.4 Utilizaci ón	15
2.2.5 Reciclaje	19
2.3 Ciclo de vida de cobre	21
2.3.1 Exploraci ón.....	21
2.3.2 Extracci ón y procesamiento.....	22
2.3.3 Fundici ón y Refino	26
2.4 Miner ía sostenible del cobre.....	36
3 Metodolog ía.....	39
3.1 An álisis de ciclo de vida.....	39
3.2 Introducci ón a SimaPro	41
3.3 Metodolog ía.....	42
3.4 Alcance del estudio.....	44
3.5 Supuestos e inventario	46
4 Resultados y discusiones	51
4.1 Resultado de ReCiPe	51
4.2 Resultado de CED	53
4.3 Comparaci ón de las fuentes de electricidad	55

4.4 Comparación de los procesos metalúrgicos.....	57
4.5 Sensibilidad de la ley de cobre a impacto ambiental.....	59
5 Conclusiones.....	63
Agradecimientos.....	64
Referencias	65

1 Introducción

En los últimos veinte años, la industria europea del cobre ha seguido invirtiendo en mejoras tecnológicas que han reducido los impactos ambientales de sus operaciones y su consumo de energía, mientras que al mismo tiempo ha incrementado su capacidad para reciclar más materiales secundarios y chatarra.

El ciclo de vida de la mayoría de productos de cobre tiene un plazo largo del uso. Luego en su fin de la vida, se podrán reciclar teóricamente en un 100%, sin mucha pérdida en el rendimiento. Por lo tanto la industria del cobre está apoyando plenamente los objetivos de desarrollo sostenible.

Debido a la evolución de las políticas de la UE, tales como la Política Integrada de Producto (IPP, Integrated Product Policy) y las directivas del fin de la vida (vehículos y residuos electrónicos), hay una creciente necesidad de datos del ciclo de vida que tengan alta calidad, sobre todo en alto tonelaje.

Además, la mayoría de los concentrados de sulfuros de cobre se tratan actualmente en los complejos de fundición y refinación. Aunque el proceso de fundición está bien desarrollado, tiene unas desventajas tales como el alto coste de nuevas instalaciones y las preocupaciones ambientales con las emisiones de dióxido de azufre. A pesar de estos inconvenientes, la fundición es un proceso relativamente eficiente para la producción de cobre. Por lo tanto, se usa mucho, tal como la fundición flash.

Se ha intentado desarrollar un proceso hidrometalúrgico para reemplazar la fundición de cobre en el pasado, pero con muy poco éxito. Uno de los principales problemas ha sido que las minerales de sulfuro de cobre, tal como la calcopirita, es muy difícil disolver en la solución de ácido o alcalino. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado una serie de nuevos procesos de la hidrometalurgia para el tratamiento de calcopirita con altas eficiencias de extracción. Uno de ellos es el proceso Intec, desarrollado por Intec Ltd.

Análisis de Ciclo de Vida es un método integrado "de la cuna a la tumba" para evaluar comportamiento medioambiental de los productos o servicios. El consumo de energía y materia prima, los diferentes tipos de emisión y otros factores importantes, se miden, analizan y agregan a lo largo de toda la vida del producto desde un punto de vista medioambiental.

Lo que hemos intentado hacer en este estudio es presentar brevemente lo que se sabe sobre el pasado, presente y futuro del cobre, sobre todo se enfoca en la extracción, mineralurgia y el proceso metalúrgico. Nuestro método se podrá caracterizar como "de la cuna a la puerta"(en lugar de "de la cuna a la tumba"). Se presenta las conclusiones pertinentes sobre todo desde una perspectiva industrial-ecológica, en lugar de una perspectiva puramente económica. Además, intentamos comparar una serie de proceso

metalúrgico para ver cuál de ellos provoca menos impacto ambiental y consume menos energía.

Este estudio se divide en cinco capítulos, incluyendo esta introducción. El siguiente capítulo está dedicado a los antecedentes históricos y geológicos, las fuentes y la producción de cobre, los usos del cobre, el consumo y la acumulación. El capítulo 3 está dedicado a las metodologías que se usan en el estudio y los supuestos y alcance del estudio. El capítulo 4 da los resultados y las discusiones. El capítulo 5 da el resumen y las conclusiones principales.

2 Estado de arte

2.1 Visión global de cobre

Cobre (del [latín](#) *cuprum*, y éste del [griego](#) *kypros*), cuyo símbolo es Cu, es un elemento químico de número atómico 29. Es un metal de transición, de color rojizo y de resplandor metálico que, junto con la plata y el oro es parte de la llamada familia del cobre. El cobre se caracteriza por ser uno de los mejores conductores de la electricidad (el segundo por detrás de la plata) (Las detalles se ven en la Tabla 2.1). Debido a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para la fabricación de cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

Tabla 2.1 Información de Cobre

Información general		Propiedades físicas	
Nombre, símbolo, número	Cobre, Cu, 29	Estado ordinario	Sólido (diamagnético)
Serie química	Metales de transición	Densidad	8960 kg/m ³
Grupo, período, bloque	11, 4, d	Punto de fusión	1357,77 K (1084,62 °C)
Masa atómica	63,536 u	Punto de ebullición	2835 K (2562 °C)
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	Entalpía de vaporización	300 kJ/mol
Dureza Mohs	3,0	Entalpía de fusión	13,1 kJ/mol
Electrones por nivel	2, 8, 18, 1	Conductividad eléctrica	58,108 × 10 ⁶ S/m
		Conductividad térmica	400 W/(K·m)

El cobre es parte de una gran cantidad de aleaciones que presentan, en general, mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad menor. Las aleaciones de cobre más importantes son el bronce (una aleación de Cu y Sn) y el latón (una aleación de Cu y Zn) (Figura 2.1). Además, gracias a que puede ser reciclado casi ilimitado sin perder sus propiedades mecánicas, el cobre es un metal duradero.



Figura 2.1 Bronce chino (izquierda) y latón (derecha)

2.1.1 El cobre en la Antigüedad

Fue uno de los primeros metales en ser utilizado por el ser humano en la prehistoria. El cobre y su aleación con el estaño, el bronce, adquirieron tanta importancia que los historiadores han llamado Edad del Cobre y Edad del Bronce a dos periodos de la Antigüedad.

1. Edad del Cobre (Sobre 7000 AD – 3000 AD)

El cobre, a diferencia de otros metales, puede encontrarse en la naturaleza en estado puro. Tiene una historia de uso de más de 10.000 años y se conoce su uso por parte de algunas de las civilizaciones más antiguas de la historia. Se estima que se descubrió en Oriente Medio hacia el año 9000 AC (Marianne, 2005) y un colgante de cobre que dató de 8700 AC y se encontró en el norte de Irak (Rayner, 2007).

La historia de la metalurgia del cobre habrá seguido la secuencia siguiente: 1. Trabajar en frío el cobre nativo, 2. Recocerlo, 3. Fundirlo, 4. El método a la cera perdida. En el sudeste de Anatolia, cuatro de estas técnicas metalúrgicas aparecieron más o menos simultáneamente al comienzo de la edad neolítica, 7500 AC (Renfrew, 1990). Sin embargo, al igual que la agricultura fue inventada independientemente en varias partes del mundo (incluyendo Pakistán, China y las Américas), la fundición de cobre fue desarrollada en varios lugares diferentes. Probablemente fue descubierta independientemente en China antes de 2800 AC, en Centroamérica tal vez alrededor del año 600 DC, y en el África occidental sobre el noveno o décimo siglo DC (Cowen, R.).

El moldeo por inversión fue inventado entre los años 4500 y 4000 AC, en el sudeste de Asia (Marianne, 2005) y la datación por carbono ha establecido la minería en Alderley Edge en Cheshire, Reino Unido, entre los 2280 y los 1890 AC (Timberlake, 2005). Ötzi, un hombre momificado encontrado en los Alpes y que data de entre 3300 y 3200 AC, se

encontró junto con un hacha con cabeza de cobre de 99,7% de pureza. Altos niveles de arsénico en el pelo sugirieron su participación en la fundición de cobre (Marianne, 2005).

La experiencia con el cobre ha ayudado al desarrollo de otros metales, en particular, la fundición de cobre llevó al descubrimiento de la fundición de hierro. La producción minera de cobre en Michigan y Wisconsin está fechada entre el 6000 y el 3000 AC (Pleger, 2002).

2. Edad de bronce (Sobre 3000 AC – 100 DC)

La aleación de cobre con estaño para hacer bronce fue practicada por primera vez unos 4000 años después del descubrimiento de la fundición de cobre, y sobre 2000 años después de que el "bronce natural" hubiese sido de uso general. Artefactos de bronce de la cultura Vinca datan del 4500 AC (Radivojević, 2013). Los artefactos egipcios y sumerios de aleaciones de cobre y bronce datan del 3000 AC (McNeil, 2002). La edad de bronce comenzó en el sureste de Europa alrededor del 3700 hasta el 3300 AC, y en el noroeste de Europa alrededor del 2500 AC.

La edad de bronce se termina con el inicio de la Edad de Hierro: 2000-1000 AC en el Cercano Oriente el año 600 AC en el norte de Europa. La transición entre el Neolítico y la Edad de Bronce fue antiguamente llamada el Calcolítico (cobre-piedra), las herramientas de cobre y las de piedra se utilizaron juntos. El latón, la aleación de cobre y zinc, es mucho más. Los primeros en usarla, que se sepa, fueron los griegos, pero se convirtió en un complemento importante para el bronce durante el Imperio Romano.

2.1.2 Edad Media y Edad Moderna

La primera utilización de latón en Reino Unido ocurrió en los siglos III – II AC. En el norte de América, la minería de cobre comenzó por los trabajos marginales de los nativos americanos. Entre 800 y 1600 DC, el cobre nativo se extraía de los yacimientos de la Isla Royale con herramientas primitivas de piedra (Martin, 1995). La metalurgia del cobre estaba floreciendo en Suramérica, sobre todo en Perú en el 1000 AC, mientras que procedió a un ritmo mucho más lento en otros continentes. El cobre ornamental se había descubierto en el siglo 15, pero la producción comercial no comenzó hasta los principios del siglo 20.

El papel cultural del cobre ha sido importante, sobre todo en la moneda. En el siglo tercero AC, los romanos utilizaban piezas de cobre como dinero. Al principio, el propio cobre fue valorado, pero poco a poco la forma y el aspecto del cobre llegaron a ser más importantes. Julio César tenía sus propias monedas hechas de latón (Figura 2.2). Con una producción anual estimada de alrededor de 15.000 t, la explotación y fundición romana del cobre llegaron a una escala sin igual hasta la época de la Revolución Industrial. Las

provincias más intensamente minadas fueron las de Hispania, Chipre y en Europa Central (Hong, S., 1996).



Figura 2.2 Una moneda de latón de Julio Cesar

2.1.3 Edad Contemporánea

La Gran Montaña de Cobre fue una mina en Falun, Suecia, que fue explotada desde el siglo 10 hasta 1992. Produjo dos tercios de la demanda del cobre de Europa en el siglo 17 y ayudó mucho a financiar las guerras de Suecia durante ese tiempo (Lynch, 2004).

Los usos del cobre no solo se limitaron a la moneda, sino que también fue utilizado por escultores del Renacimiento en la tecnología fotográfica, como el daguerrotipo o en la Estatua de la Libertad (Figura 2.3). La Norddeutsche Affinerie en Hamburgo fue la primera fábrica de galvanoplastia moderna, comenzando su producción en 1876 (Stelter, 2004). El científico alemán Gottfried Osann inventó la metalurgia de polvos o pulvimetalurgia en 1830, mientras determinaba la masa atómica del metal. Alrededor de entonces, la cantidad y tipo de elemento de aleación (tal como el estaño) del cobre se han descubierto con las que afectarían tonos de campana. La fusión flash fue desarrollada por Outokumpu en Finlandia y fue aplicada por primera vez en Harjavalta en 1949; este proceso de bajo consumo representa el 50% de la producción primaria de cobre en el mundo.



Figura 2.3 El daguerrotipo (izquierda), y la Estatua de la Libertad (derecha).

Aunque su uso perdió importancia relativa con el desarrollo de la siderurgia, el cobre y sus aleaciones siguieron siendo empleados para hacer objetos tan diversos como monedas, campanas y cañones. A partir del siglo XIX, concretamente con la invención del generador eléctrico en 1831 por Faraday, el cobre se convirtió de nuevo en un metal estratégico, al ser la materia prima principal de cables e instalaciones eléctricas.

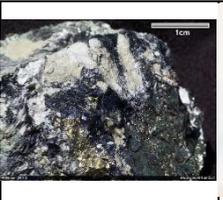
2.2 Producción y comercio

El cobre se ha utilizado por lo menos 10.000 años, pero más del 96% de todo el cobre extraído y fundido se extrae desde 1900, y más de la mitad fue extraído en solo los últimos 24 años. Aunque la cantidad total de cobre en la Tierra es enorme, solo una pequeña fracción de estas reservas es económicamente rentable dependiendo de los precios actuales y tecnologías. Bajo la situación competente de geología, económica, medio ambiental y condición legal, la mina se puede explotar.

El cobre se obtiene a partir de minerales sulfurados (80 %) y de minerales oxidados (20 %), los primeros se tratan por un proceso denominado pirometalurgia y los segundos por otro proceso denominado hidrometalurgia.

Los principales minerales de sulfuro de cobre son calcopirita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S), covelita (CuS), bornita (Cu_5FeS_4) y tetraedrita ($(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$). (como se ve Tabla 2.2) La fuente principal de cobre es la de depósitos de mineral pórfido en la que una combinación de los minerales antes mencionados se produce. Un mineral de sulfuro cobre típico contiene varios niveles de tipos de sulfuro de hierro que generalmente incluyen pirita (FeS_2) y pirrotita (Fe_{1-x}S). A menudo están presentes oro y plata que o bien pueden asociarse con los sulfuros o estar libres. Las partículas ganga pueden estar formadas por una gama de minerales de silicato desde cuarzo hasta talco y arcillas. También pueden estar presentes carbonatos de mineral ganga.

Tabla 2.2 Los principales minerales de sulfuro de cobre

				
Calcopirita	Calcocita	Covelita	Bornita	Tetraedrita
CuFeS_2	Cu_2S	CuS	Cu_5FeS_4	$(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$

Los minerales oxidados de cobre se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Generalmente, están en la superficie de la mina del cobre, así que son los primeros en ser explotados. Los principales son los siguientes: (en la Tabla 2.3)

Tabla 2.3 Los principales minerales oxidados de cobre

			
Malaquita	Azurita	Crisocola	Cuprita
$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	$(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Cu_2O

2.2.1 Producción minera

La producción primaria de cobre comienza con la extracción de minerales de cobre. Hay dos formas básicas de la minería de cobre: la mina a cielo abierto y la mina subterránea. La mina a cielo abierto es el método de explotación predominante en el mundo.

Después de que el mineral ha sido extraído, se tritura y se muele seguido de una concentración por flotación. El cobre obtenido se concentra normalmente contiene alrededor de 30% de cobre, pero los grados pueden variar de 20% a 40%. En el siguiente proceso de fundición, el cobre se transforma en ánmate que contiene 50% - 70% de cobre. La mata fundida se procesa en un convertidor que resulta en cobre blístico de 98,5% a 99,5% de cobre. Al final, el cobre blístico se refina por fuego en el proceso tradicional, o vuelve a fundirse en ánodos para electro-refinación. El producto de la electro-refinación se acumula en los cátodos que contiene 99.99% de cobre.

Alternativamente, en la hidrometalurgia, el cobre se extrae a partir de los óxidos y sulfuros, a través de la lixiviación (extracción por solvente) y extracción electrolítica (procesos de SX-EW, solvent extraction and electrowinning). La salida es la misma que a través del electro-refinación de cátodos de cobre. ICSG (International Copper Study Group) estima que en 2013 la producción del cobre refinado de SX-EW, representaba el 18% de la producción total.

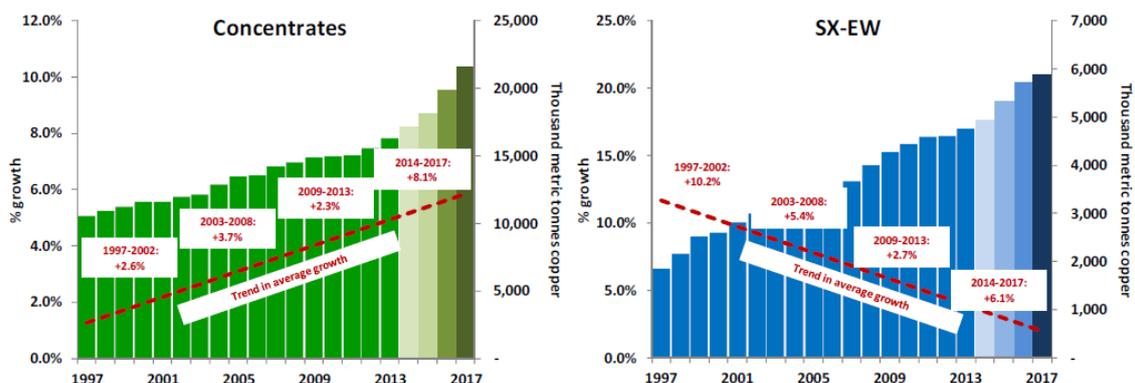


Figura 2.4 Tendencias de la capacidad de la minería del cobre, unidad: Mil Toneladas (Fuente: Directorio de las minas y plantas del cobre, ICSG, julio de 2014)

En la Figura 2.4, la capacidad de la extracción de cobre se estima que alcanzará 27,5 millones de toneladas de cobre en 2014, con el 21% de la producción de SX-EW. Esto será sobre el 30% superior a la capacidad de 21,0 millones de toneladas de cobre registrados en 2013. Como los gráficos ilustran, el crecimiento de la capacidad de concentrado en general va aumentando, mientras que el crecimiento de SX-EW va disminuyendo. Esta tendencia podrá revertir en el futuro a medida que las operaciones nuevas y las capacidades de extracción de cobre se utilicen.

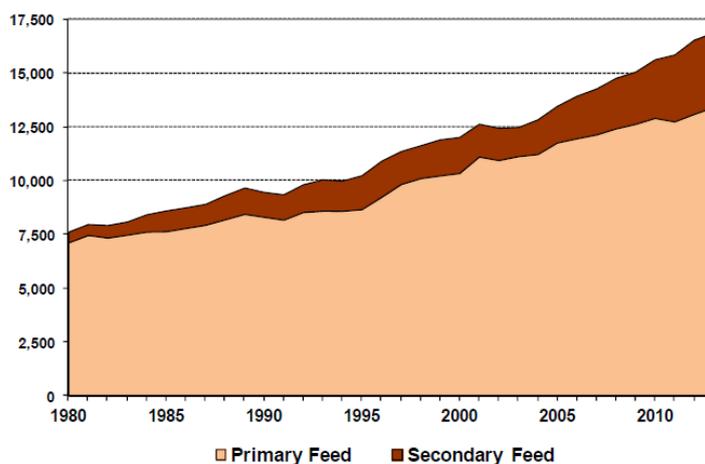


Figura 2.5 Producción mundial de fundición de cobre, 1980-2013, unidad: Mil Toneladas. (Fuente: ICSG)

En la Figura 2.5, la fundición es el proceso pirometalúrgico utilizado para producir cobre metálico. En 2013, la fundición de cobre mundial alcanzó 16,8 millones de toneladas de cobre. Recientemente, a través de los procesos de lixiviación, la tendencia para recuperar la producción del cobre ha sido en aumento. Las fundiciones primarias usan minerales concentrados como su alimentación principal (aunque algunos también usan chatarra del cobre). Las fundiciones secundarias usan chatarras de cobre como su alimentación.

2.2.2 Reservas

Los principales países que producen cobre y sus reservas se observan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Los datos de las producciones y las reservas del cobre mundial (Fuente: USGS)

	Mine production		Reserves
	2013	2014	
United States	1,250	1,370	35,000
Australia	990	1,000	93,000
Canada	632	680	11,000
Chile	5,780	5,800	209,000
China	1,600	1,620	30,000
Congo (Kinshasa)	970	1,100	20,000
Indonesia	504	400	25,000
Kazakhstan	446	430	6,000
Mexico	480	520	38,000
Peru	1,380	1,400	68,000
Poland	429	425	28,000
Russia	833	850	30,000
Zambia	760	730	20,000
Other countries	2,200	2,400	90,000
World total (rounded)	18,300	18,700	700,000

Es importante tener en cuenta que Chile produce un tercio del cobre mundial y mientras tiene la reserva más abundante. (Ver Tabla 2.4) Además, hay que tener en cuenta aunque China es el segundo país que produce cobre, pero no tiene tantas reservas como Chile como veremos en la sección 2.2.3.

Tabla 2.5 Reservas y recursos de minerales de cobre y ley media para el periodo 2001-2007, separados por tipo de mena o mineral, en millones de toneladas. (Fuente: SNGM)

Mineral	Unidad	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Total mineral	mill.toneladas	29060,6	32035,5	35707,1	41061,8	41449,1	42107,0	54039,9
Ley	%	0,779	0,799	0,756	0,720	0,714	0,719	0,681
Total sulfuros	mill.toneladas	24117,1	26866,2	29640,2	32686,9	34153,5	34798,7	35169,8
Ley	%	0,824	0,808	0,810	0,781	0,737	0,735	0,703
Total óxidos	mill.toneladas	4318,4	4653,0	4563,7	4958,2	5013,5	5168,9	5321,2
Ley	%	0,527	0,501	0,560	0,506	0,500	0,491	0,518
Total mixtos	mill.toneladas	625,1	516,3	1503,2	3416,8	2282,1	2139,4	13548,9
Ley	%	0,788	0,907	0,757	0,492	0,552	0,636	0,688

La mayor parte de las reservas (ca. 94%) y recursos de cobre están contenidos en yacimientos del tipo púrfido de cobre-molibdeno o cobre-molibdeno-oro, que son explotados por las empresas que constituyen la gran minería del cobre (e.g., Chuquicamata, Escondida). Otra parte de las reservas están en yacimientos del tipo óxidos de hierro-cobre-oro (e.g., Candelaria) y de tipo manto (e.g., Mantos Blanco) que concentran aproximadamente un 5% de las reservas y recursos. La pequeña minería, que explota, mayoritariamente, pequeños yacimientos vetiformes, tiene menos del 1% de las reservas y recursos. La situación descrita presenta una muy buena correlación con las estadísticas de producción, puesto que la producción de cobre en Chile está concentrada en un alto porcentaje en la gran minería cuya producción el año 2007 alcanzó a 5.229.276 toneladas de cobre fino, lo que representa el 94% del total de cobre producido en el país. Por su parte, las empresas medianas aportan con un 5% y las empresas pequeñas un 1%.

Desde el punto de vista geográfico, la mayor cantidad de reservas y recursos de cobre se concentran, por orden de importancia, en las regiones de Antofagasta, Tarapacá Región Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins, Coquimbo, de Valparaíso y Atacama. Lo que constituye un reflejo de la distribución geográfica de los principales yacimientos y distritos mineros del país, controlada, en último término, por factores geológicos.

La información de las reservas y recursos de cobre, analizada en términos de millones de toneladas de mineral o mena de cobre muestra, para el periodo 2001-2007, un incremento aún más marcado que cuando estas se consideran en términos de cobre fino contenido, desde 29.000 millones de toneladas de mineral el año 2001 a 54.000 millones de toneladas de mineral el año 2007, es decir un incremento de 86% (Tabla 2.5).

En cuanto a las leyes de las reservas y recursos de mineral de cobre, los gráficos muestran que hay una disminución importante de las leyes medias de los yacimientos para el periodo estudiado, lo cual es especialmente notable para los sulfuros de cobre los que caen desde una ley media de 0,824% el año 2001 a una ley media de 0,723% de cobre el 2007, vale decir una disminución de un 12,2% (Tabla 2.5).

Por otra parte, estos incrementos de las reservas y recursos están directamente relacionados con el aumento sostenido, en el periodo analizado, del precio internacional de la libra de cobre, que de 71,5 centavos de dólar la libra en el año 2001 aumentó a 323,5 centavos de dólar la libra el año 2007, vale decir un incremento superior al 350%. Debido a lo anterior, una parte significativa del incremento de las reservas, puede ser explicado por los altos precios de la libra de cobre, que hizo posible incorporar a los recursos y reservas, minerales de baja ley, posibles de explotar por las condiciones favorables del mercado.

Los recursos inferidos y aquellos recursos que en el transcurso del periodo analizado estaban siendo cuantificados en la etapa de exploración, no fueron considerados para este

informe. Un resumen para el 2007 señala que los recursos inferidos informados por las empresas son del orden de los 38.000 millones de toneladas de minerales de cobre, con una ley media esperada de 0,5% de cobre total. De este tonelaje, un 86% corresponde a sulfuros de cobre y el resto a óxidos y mixtos de cobre. Adicionalmente, las empresas informaron, para el año 2007, del orden de 1.800 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley esperada de 0,48% de cobre total, como recursos sin categorizar, detectados en proyectos con exploración incipiente. Estos recursos inferidos de minerales de cobre, constituyen un potencial para el futuro crecimiento de la industria extractiva del cobre y son parte de los inventarios de las principales empresas mineras que operan en Chile y que seguramente, en un volumen importante, serán, en los próximos años, transformados en recursos medidos e indicados.

El país dispone de un importante inventario de reservas y recursos de cobre, que aseguran la producción de las próximas décadas. Sin embargo es necesario destacar que la mayor parte de estos se encuentran contenidos en sulfuros de la mena o mineral primario y muestran una tendencia a la disminución de sus leyes. También es necesario destacar que la cantidad de recursos contenidos en minerales oxidados, ha experimentado una baja durante el periodo, lo que constituye un llamado de atención con respecto a una posible caída de las reservas de minerales lixiviables en el futuro. El hecho de que la mayor parte de las reservas y recursos de cobre se encuentren contenidos en sulfuros primarios, que muestran leyes descendentes, implica que para mantener, a futuro, el actual nivel de producción, será necesario ampliar la capacidad de procesamiento de minerales, de manera de compensar la disminución de la ley.

En resumen, los inventarios de reservas y recursos de cobre del país están muy relacionados con la dinámica de las condiciones de mercado, donde aumentos notables en el precio del metal posibilitan a las empresas mineras a mover a la baja la ley de corte de explotación. En consecuencia, millones de toneladas de recursos mineros de baja ley, solo por el efecto de un mejor precio, pueden ser incorporados al inventario de recursos y reservas y determinar cambios en él.

2.2.3 Comercio y consumo

Productos de cobre internacionalmente se comercian en toda la cadena de valor. A menudo, los países aguas arriba tienen más capacidad de la producción de cobre que los países aguas abajo. Así que es necesario importar las materias primas para satisfacer sus necesidades de producción, y viceversa. Las principales categorías de los productos de cobre que se cotizan internacionalmente incluyen:

- Concentrado de cobre seco (Copper concentrates)
- Cobre blíster o anódico (Copper blister and anode)
- Cobre catódico y lingotes (Copper cathode and ingots)

- Chatarra de cobre (Copper scrap)
- Cobre semielaborado (Copper semis)

Polvos de cobre y sus compuestos también se comercian globalmente, pero en general sus cantidades son muchos menores que las categorías mencionadas arriba. Además, los productos finales de cobre también se comercian globalmente, tales como automóviles, electrodomésticos, equipos electrónicos y otros productos.

En las siguientes figuras se muestran las situaciones del comercio internacional de cobre. (Ver Figura 2.6, Figura 2.7 y Figura 2.8) Se tiene en cuenta que Chile exporta mayor cantidad de cobre sobre todo las minerales y el cobre blíster. Además China importa la más cantidad de cobre, por esta razón, China ocupa el segundo lugar de la producción de cobre.



Figura 2.6 Flujos del comercio internacional de las minerales y concentrados de cobre (Fuente: ICSG)



Figura 2.7 Flujos del comercio internacional del cobre blíster y anódico (Fuente: ICSG)

Major Exporters of Refined Copper, 2013

1. Chile
2. Japan
3. Australia
4. Kazakhstan
5. Poland
6. China
7. Peru
8. Malaysia
9. India
10. Belgium



Major Importers of Refined Copper, 2013

1. China
2. United States
3. Germany
4. Italy
5. Malaysia
6. Taiwan
7. Turkey
8. Korean Rep.
9. Thailand
10. Brazil

Figura 2.8 Flujos del comercio internacional del cobre refinado (Fuente: ICSG)

El cobre se suministra a los fabricantes como catódicos, palanquillas, torta o lingote. A través de la extrusión, forjamiento, fusión, electrólisis, etc., se transforma en alambre, cable, varilla, tubos, placas, hojas, piezas, polvos y otras formas. (Ver Figura 2.9) Los fabricantes de estas formas se conocen como los primeros usuarios del cobre. Los primeros usuarios del cobre funden directamente la totalidad de cobre incluyendo la chatarra para producir cobre semielaborado.

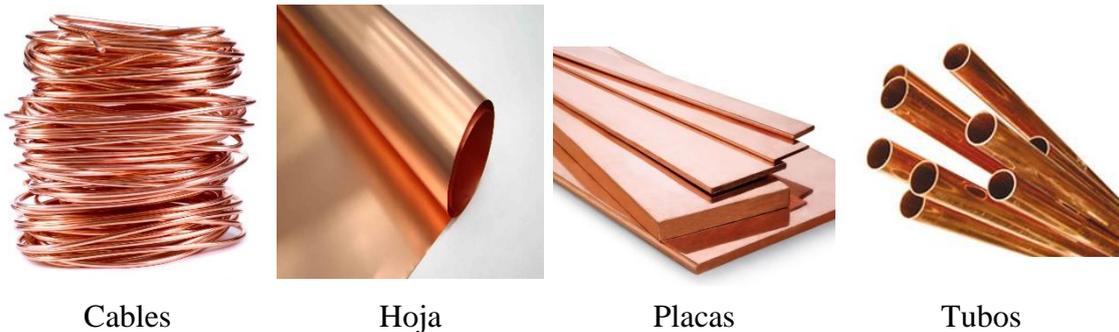


Figura 2.9 Los productos de cobre

Las industrias aguas abajo pueden transformar cobre y sus aleaciones semielaborados en productos del uso final, tales como automóviles, electrodomésticos, electrónica, y otras formas dependiendo de a qué necesidades van a satisfacer.

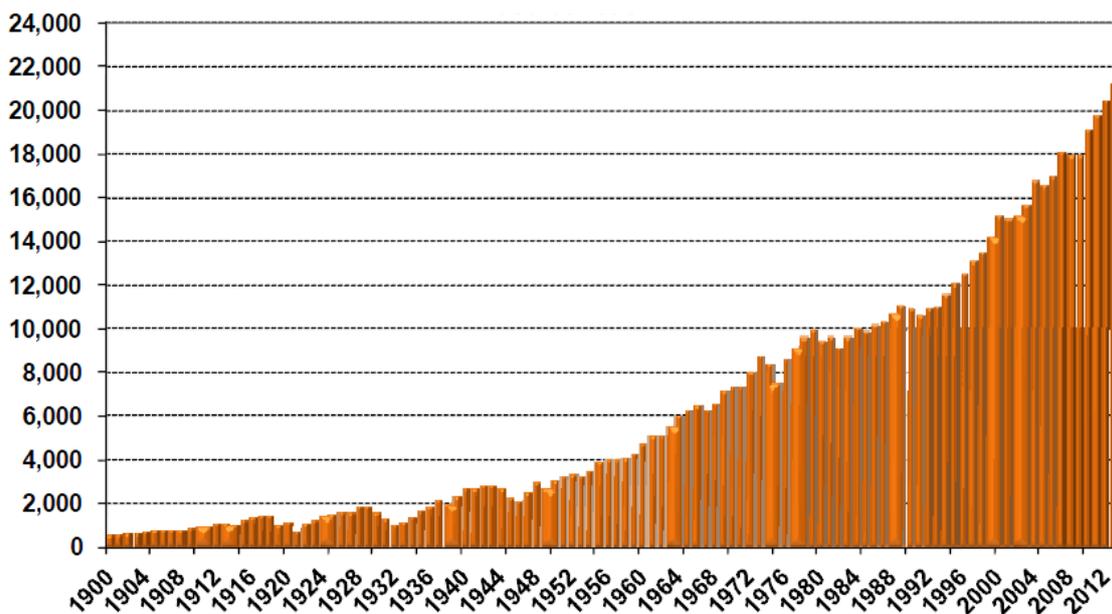


Figura 2.10 La cantidad del uso mundial del cobre, 1900-2013 (Unidad: Mil Toneladas, Fuente: ICSG)

Desde 1900, el uso aparente del cobre refinado ha aumentado de menos de 500 mil toneladas a 21,2 millones toneladas en 2013. Durante este tiempo, la tasa compuesta del crecimiento anual ha llegado 3,4% por año.

2.2.4 Utilización

1. El eléctrico

El cobre es el mejor conductor metálico no precioso de la electricidad, ya que tiene menos resistencia comparado con otros metales de uso común. El cobre es el estándar con el que se comparan otros conductores. Se establece el estándar para que otros conductores se puede comparar con el cobre. Además, gracias a la fuerza excepcional, la ductilidad del cobre y resistencia a la corrosión, ya ha sido el conductor preferido y más seguro para el cable de los edificios comerciales y residenciales.

El cobre es un componente esencial de los generadores de energía eficientes, motores, transformadores y los sistemas de producción de energía renovable.

2. Electrónica y comunicación

El cobre juega un papel clave en telecomunicación en todo el mundo. Tecnología HDSL (Línea de abonado digital de alta velocidad binaria, High Digital Subscriber Line en inglés) y ADSL (Línea de abonado digital asimétrica, Asymmetrical Digital Subscriber Line en inglés) permite la transmisión de datos de alta velocidad, incluyendo el servicio de Internet, a través de la infraestructura del cable telefónico ordinario de cobre. El cobre

y sus aleaciones se utilizan en l líneas nacionales de abonado, redes de área local, teléfonos móviles y ordenadores personales. (Ver Figura 2.11)



Figura 2.11 El cable telefónico

3. Construcción

El cobre y el bronce son los materiales de elección primaria para plomería, grifos, válvulas y accesorios. Gracias a su atractivo estético, el cobre y sus aleaciones, como el bronce arquitectónico, se utiliza en una variedad de ajustes para construir murales, cubiertas, puertas y marcos de ventanas. (Ver en la Figura 2.12)



Murales



Cubiertas



Puertas

Figura 2.12 Unos ejemplos sobre el uso del cobre de la construcción

A diferencia del tubo de plástico, el cobre no se quema, no se derrite y libera humos nocivos o tóxicos en caso de incendio. Los tubos de cobre también ayudan a proteger los sistemas de agua de las bacterias potencialmente letales como la legionela. Los sistemas de rociadores de cobre contra incendios de cobre son una característica importante de seguridad en los edificios.

Además, el uso de los mandos y puertas de cobre previenen la transmisión de enfermedades y microbios gracias a sus propiedades biostáticas.

4. Transporte

Todas las principales formas de transporte dependen del cobre para realizar las funciones críticas. Las aleaciones de cobre-níquel se utilizan en los cascos de los barcos y buques para reducir la contaminación biológica marina, con lo cual reduce la fricción y mejora el consumo de combustible. Los automóviles y camiones tienen muchas partes que están hechas de cobre, tales como motores, cableados, radiadores, conectores y frenos. Ahora, un automóvil de tamaño mediano en promedio contiene alrededor de 22,5 kg de cobre, mientras que los coches lujosos en promedio contienen alrededor de 1.500 cables de cobre con 1,6 km de longitud.

Los vehículos eléctricos e híbridos pueden contener más cobre. A través de su conductividad superior, dureza, resistencia a la corrosión térmica y reciclabilidad, el cobre es ideal para radiadores de automóviles y camiones. (Ver Figura 2.13) Por otra parte, el cobre también se usa ampliamente en aviones y trenes de nueva generación. Los nuevos trenes de alta velocidad pueden usar de 2 a 4 toneladas de cobre, significativamente más altos que los de 1 a 2 toneladas utilizados en los trenes tradicionales.



Figura 2.13 El radiador de cobre de coche

5. Maquinaria y Equipo Industrial

El cobre y sus aleaciones se encuentran en cualquier maquinaria y equipo industrial. Debido a su durabilidad, maquinabilidad (Machinability) y la capacidad de ser fundido con una alta precisión y altas tolerancias. Las aleaciones de cobre son ideales para la fabricación de productos tales como engranajes, cojinetes y álabes de la turbina. (Ver en la Figura 2.14)



Engranajes



Cojinetes

Figura 2.14 Engranajes y Cojinetes

Gracias a su alta capacidad para transferir el calor, el cobre es una opción ideal para los equipos del intercambio de calor, recipientes a presión y tanques. Además, debido a su resistencia a la corrosión, el cobre es especialmente adecuado en el ambiente marino y otros entornos exigentes.

6. Productos generales y de consumo

Desde el comienzo de la civilización el cobre ha sido utilizado por varias sociedades para hacer monedas. En la actualidad, los países están reemplazando los efectivos de denominación baja a la moneda de cobre, ya que estas monedas duran 10, 20 e incluso 50 veces más.

En Estados Unidos, las monedas de uno y cinco céntimos contienen 2,5% y 75% de cobre respectivamente, mientras que otras monedas de los EEUU contienen un núcleo de cobre puro. (Ver en la Figura 2.15) En la Unión Europea recientemente, las monedas de euro, primero introducido en 2002, también contienen cobre.



Un céntimo de dólar



Cinco céntimos de dólares



Un dólar

Figura 2.15 Las monedas de dólares

El cobre y productos basados en cobre se utilizan en oficinas, hogares y los lugares de trabajo. Como los computadores, los electrodomésticos y los utensilios de cocina solo son algunos de los productos que explotan las ventajas del cobre.

7. Otros

Además, el cobre posee un importante papel biológico en el proceso de fotosíntesis de las plantas, aunque no forma parte de la composición de la clorofila. El cobre contribuye a la formación de glóbulos rojos y al mantenimiento de los vasos sanguíneos, nervios, sistema inmunitario y huesos y por tanto es un oligoelemento esencial para la vida humana (Juan Salvat, 1984).

Por otra parte, se encuentra en una gran cantidad de alimentos habituales de la dieta tales como ostras, mariscos, legumbres, vísceras y nueces entre otros, además del agua potable y por lo tanto es muy raro que se produzca una deficiencia de cobre en el organismo. El desequilibrio de cobre ocasiona en el organismo una enfermedad hepática conocida como enfermedad de Wilson.

2.2.5 Reciclaje

El cobre es uno de los pocos materiales que no se degradan o pierden sus propiedades químicas ni físicas en el proceso de reciclaje. En las últimas décadas, un creciente énfasis se ha puesto en la sostenibilidad de los usos de material en el que el concepto de reutilización y reciclaje de metales juega un papel importante en la elección de materiales y en la aceptación de los productos. Si se maneja adecuadamente, el reciclaje tiene mucho potencial para extender el uso de los recursos, y minimizar el uso de energía, algunas emisiones y la eliminación de residuos.

A través de una mayor reutilización y reciclaje, el cierre de bucles de metal puede mejorar la productividad total de los recursos, con lo cual representa uno de los elementos claves de la transición de la sociedad hacia los modelos más sostenibles de producción y consumo. Es ampliamente reconocido que el reciclaje no está en oposición a la producción de los metales primarios, pero es un complemento necesario y beneficioso.

En 2012, ICSG estima que más del 30% del consumo de cobre vino del reciclado. En algunos países, sus requerimientos de cobre dependen en gran medida de cobre reciclado para satisfacer las demandas internas. Sin embargo, el cobre reciclado por sí sola no puede satisfacer las necesidades de la sociedad, así que también dependemos del cobre producido a partir del tratamiento de los minerales.

Definiciones de los ratios de cobre reciclado

Los tres grupos del estudio de metales no ferrosos (uno de cobre, uno de níquel y otro de plomo y zinc) en conjunción con otras asociaciones diferentes de la industria de metales llegan a un acuerdo en las definiciones comunes de las tres siguientes ratios de metales reciclados:

1. La Ratio del Reciclaje de Entrada (en inglés The Recycling Input Rate, RIR) mide la proporción de metal y de los productos metales que se producen a partir de la chatarra y otros residuos que contienen bajo grado de metal. El RIR es principalmente una medida estadística de la disponibilidad de materias primas y suministros sino un indicador de la eficiencia del reciclaje.

$$RIR = \frac{\text{Metal Reciclado}}{\text{Metal producido}}$$

2. La Ratio General de la Eficiencia de Reciclaje (en inglés The Overall Recycling Efficiency Rate, Overall RER) indica la eficiencia de los materiales del fin de vida (The end of life, EOL) tales como chatarra, chatarra nueva, y otros residuos que son recogidos y reciclados.

$$\text{Overall RER} = \frac{\text{Metal Reciclado (chatarra nuevo y EOL)}}{\text{Metal Disponible para reciclar(chatarra nuevo y EOL)}}$$

3. La Ratio de la Eficiencia de Reciclaje EOL (EOL RER) indica la eficiencia con la que se recicla EOL chatarra de productos obsoletos. Esta medida se concentra en el rendimiento de la gestión de los productos del fin de vida (EOL) y proporciona información importante a las audiencias objetivas, como las industrias de metales y de reciclaje.

$$\text{EOL RER} = \frac{\text{Metal Reciclado (chatarra EOL)}}{\text{Metal Disponible para reciclar}}$$

Tabla 2.6 El uso reciclable del cobre global, 2004-2012 (Fuente: ICSG)

Unidad: Mil toneladas

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Americas	1,324	1,325	1,395	1,441	1,275	1,143	1,198	1,256	1,213
Asia	3,279	3,468	4,132	4,244	4,706	4,192	4,913	4,951	4,993
Europe	2,624	2,440	2,585	2,556	2,424	1,927	2,226	2,119	2,177
Africa & Oceania	37	37	25	29	24	23	24	33	56
World / Total Scrap Use	7,269	7,279	8,141	8,279	8,437	7,290	8,365	8,366	8445
Scrap use Annual Growth	9%	0%	12%	2%	2%	-14%	15%	0%	1%
Secondary refined production	2,069	2,161	2,613	2,738	2,823	2,841	3,250	3,470	3,580
Cu content of Direct Melt	5,199	5,118	5,528	5,541	5,614	4,448	5,116	4,896	4,865
Refined Usage	16,838	16,674	17,034	18,196	18,053	18,070	19,346	19,830	20,550
Total copper usage	22,037	21,792	22,563	23,737	23,667	22,518	24,462	24,726	25,415
Recycling Input Rate (RIR)	33%	33%	36%	35%	36%	32%	34%	34%	33%
Asia	31%	32%	37%	34%	36%	30%	33%	33%	31%
Europe	42%	41%	41%	41%	42%	44%	45%	42%	45%
North America	29%	29%	32%	33%	32%	34%	33%	34%	33%
Rest of the World	13%	15%	15%	18%	16%	14%	12%	14%	14%

Teniendo en cuenta como se aprecia en la Tabla 2.6 el RIR en Europa es mayor valor, le siguen Asia y América del Norte.

2.3 Ciclo de vida de cobre

El cobre se encuentra normalmente en asociación con azufre en la naturaleza. El metal de cobre puro se produce generalmente a partir de varias etapas, comenzando con la extracción y concentración de minerales de bajo grado que contienen minerales de sulfuro de cobre, y siguiendo por la fundición y refinación electrolítica para producir un cobre puro. Una parte cada vez mayor de cobre se produce a partir de la lixiviación ácida de los minerales oxidados.

2.3.1 Exploración

La búsqueda y definición de nuevos yacimientos son realizadas normalmente por un equipo de profesionales, encabezado por geólogos. Se distribuyen en los siguientes etapas:

1. Exploración básica. 2. Exploración intermedia. 3. Exploración avanzada.

1. Primera etapa: Exploración básica

En esta primera etapa se efectúa un reconocimiento general de un área extensa con el fin de identificar algunas características favorables que puedan indicar la presencia de un yacimiento. Una vez los geólogos identifican el área con el estudio de los diferentes antecedentes y técnicas específicas, el equipo se dirige al terreno para registrar las características de las rocas y su ubicación, y para recoger muestras que permitirán determinar si contiene cobre.

2. Segunda etapa: Exploración intermedia

En esta etapa se confirma la existencia de mineralización de cobre en profundidad, de acuerdo con la información recogida en la etapa anterior. Una vez localizada el área de interés, se realizan con mayor detalle trabajos geofísicos tales como magnetometría, gravimetría, resistividad, etc. y trabajos geoquímicos como la obtención y características que interesan en diferentes mapas, lo que permite aumentar la precisión y reducir el radio de búsqueda del mineral. La información recolectada permite diseñar la perforación de algunos sondeos exploratorios para extraer muestras de distintas profundidades y determinar la posible continuación de la mineralización bajo la superficie. El resultado ayuda a hallar la identificación de un posible yacimiento, ubicado en un área más o menos definida.

3. Tercera etapa: Exploración avanzada

En esta etapa se determina con mayor precisión la forma y extensión del yacimiento y la calidad, es decir, la ley del mineral. Se realiza mediante la perforación de más sondeos, distribuidos en una malla regular, que atraviesan el mineral. Además, mediante los sondeos se pueden reconocer otras características del yacimiento, los tipos de mineral, su alteración, estructuras, densidad, dureza, fracturación, etc.

Los resultados de las características del yacimiento, el tipo de mineral y su ley constituyen la primera información fundamental para el diseño de una futura explotación, ya que permiten estimar el comportamiento geotécnico y geometalúrgico, y el posible rendimiento económico del mineral.

2.3.2 Extracción y procesamiento

El objetivo de este proceso es extraer la porción mineralizada con cobre y otros elementos desde el macizo rocoso de la mina, que puede ser a cielo abierto, subterránea (Figura 2.16) o la combinación de ambas, y transportarla a la planta de procesamiento, en forma eficiente y segura, para ser sometida al proceso de obtención del cobre y otros elementos.



Figura 2.16 La mina a cielo abierto (izquierda) y la mina subterránea (derecha)

1 Mina a cielo abierto

Este tipo de extracción se utiliza cuando los yacimientos presentan una forma regular y están ubicados en la superficie o cerca de ésta, de manera que el material estéril que lo cubre pueda ser retirado a un costo tal que pueda ser absorbido por la explotación de la porción mineralizada. Este sistema de extracción permite utilizar equipos de grandes dimensiones, ya que el espacio no está restringido como en el caso de las minas subterráneas, aunque su operación puede estar limitada por el clima, como es el caso de las minas ubicadas en alta cordillera o zona central del país.

La extracción del material se realiza siguiendo una secuencia de las siguientes fases: Perforación, Voladura, Carga, Transporte.

1. Perforación

Las perforaciones en el banco deben realizarse a distancias regulares, generalmente entre 8 y 12m (malla de perforación), de manera que atraviesen toda la altura del banco para que, al introducirse los explosivos, la detonación permita fragmentar la roca.

Para realizar las perforaciones, se utilizan grandes equipos de perforación rotatoria, equipados con barrenos de carburo de tungsteno de 12 pulgadas de diámetro, que permite perforar un sondeo de 15 m de longitud en sólo 20 minutos. Las máquinas perforadoras más usadas en la actualidad, en las operaciones a cielo abierto, son las de percusión y las exclusivamente rotativas.

En esta fase se consume mucha agua y energía eléctrica.

2. Voladura

En cada barreno cargado con explosivo, se introduce un detonante de encendido eléctrico, que se activa mediante control remoto. Se establece una secuencia de detonaciones entre los distintos sondeos de una voladura, de manera que la roca sea fragmentada en etapas partiendo de la cara expuesta del banco hacia adentro, con diferencias de tiempo de fracciones de segundo entre cada detonación.

El producto obtenido es la roca mineralizada fragmentada de un tamaño suficientemente pequeño (en general menor que 1 m de diámetro) como para ser cargada y transportada por los equipos mineros y alimentar a la trituradora primaria, en donde se inicia los procesos de reducción de tamaño en un sistema en línea hasta llegar a la planta de tratamiento.

3. Carga

El material volado es cargado en camiones de gran tonelaje mediante gigantescas palas eléctricas o cargadores frontales (Figura 2.17) Estos equipos llenan los camiones en una operación continuada desde que queda disponible el banco tras la voladura.



Figura 2.17 Cargando a un camión

Las palas eléctricas tienen capacidad para cargar 70 o 100 toneladas de material de una vez, por lo que realizan tres movimientos o pases para cargar un camión. Los cargadores tienen menor capacidad y en minas de gran tamaño se utilizan sólo para trabajos especiales.

Una pala necesita un frente de carga mínimo de 65 m de ancho y carga camiones que se van colocando alternativamente a cada lado de ella.

4. Transporte

Para el transporte del material mineralizado y el material estéril, se utilizan camiones de gran tonelaje, por ejemplo 240 o 300 toneladas. Estos transportan el material desde el frente de carga a sus diferentes destinos: El mineral aprovechable a la trituradora primaria, el material estéril a escombreras y el mineral de baja ley a vertederos especiales.

2 Mina subterránea

El método de explotación subterránea, es utilizado cuando las zonas mineralizadas (vetas o cuerpos de mineral económico) son angostas y profundas, por lo que según las evaluaciones técnicas y económicas justifica la perforación de túneles y socavones para posibilitar su extracción. Se realiza por medio de obras y trabajos en el interior de la tierra: pozos, galerías, cámaras, túneles, socavones y planos etc., con el objeto de acceder a la masa de mineral y extraerla, sin tener que mover los estériles o materiales que recubren el yacimiento.

A diferencia de la explotación a cielo abierto, una mina subterránea extrae el mineral desde abajo hacia arriba, utilizando lo más posible la fuerza de gravedad para producir la

fragmentación y el desplazamiento del mineral hacia los puntos de carga. La otra diferencia importante es que en la mina subterránea no se extrae roca estéril, sino que debido a los altos costos que implica la construcción de túneles, la explotación se concentra preferentemente en las zonas de mineral (Figura 2.18).

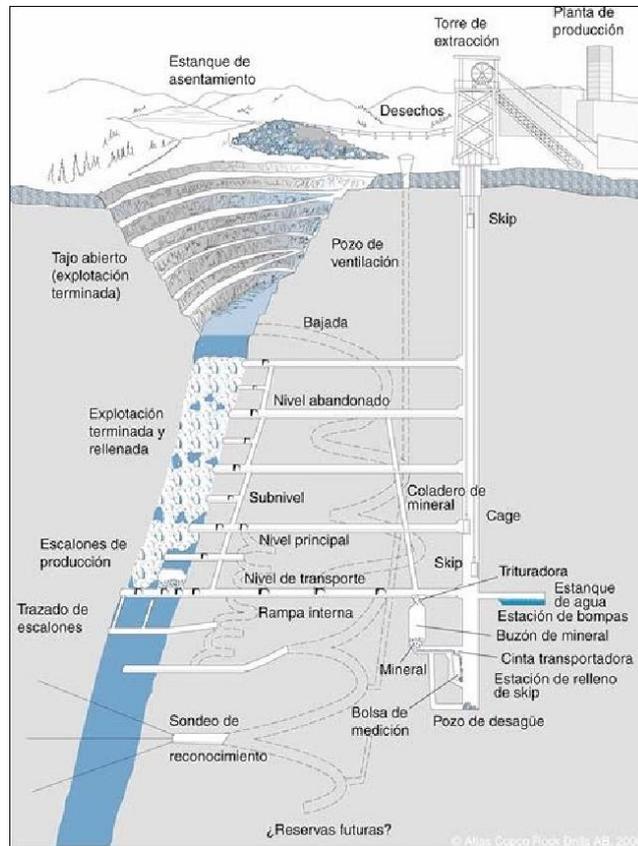


Figura 2.18 Esquema de la explotación de un yacimiento a abierto y subterráneo

Las actividades o procesos que comprende este método de explotación son: preparación, explotación y extracción, transporte y manipulación de minerales. Las etapas son similares a las de las minas a cielo abierto, pero su magnitud es mucho menor, el espacio de trabajo es restrictivo, la maquinaria utilizada es más pequeña. Por ejemplo, en la explotación a cielo abierto de Chuquicamata en Chile se usan camiones con una capacidad de carga de 345 toneladas, pero en la explotación subterránea de la misma mina, el camión que se utiliza tiene una capacidad de solo 50 toneladas (El informe de Chuquicamata, 2009). Además, las labores que son subterráneas necesitan más seguridad. Por ejemplo, el sostenimiento en los túneles de uso frecuente y prolongado, sobre todo aquellas de los lugares por donde deben transitar equipos y personas, debe contar con un factor de seguridad mayor. Por eso, es un método en general más costoso.

Generalmente dentro del método de explotación subterránea puede distinguirse tres grandes grupos:

1. SOSTENIMIENTO DE LOS HUECOS CON MACIZOS.

- METODO DE CAMARAS Y PILARES
- METODO DE TAJEO POR SUBNIVELES
- METODO DE CRATERES INVERTIDOS

2. RELLENO O FORTIFICACIÓN DE LOS HUECOS.

- METODO DE CORTE Y RELLENO (ASCENDENTE O DESCENDENTE)
- METODO DE ALMACENAMIENTO PROVISIONAL
- METODO DE ENTIBACION CON CUADROS
- METODO DE TAJEOS LARGOS

3. HUNDIMIENTO CONTROLADO DE LOS HUECOS.

- METODO DE HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES
- METODO DE HUNDIMIENTO POR BLOQUES

Dependiendo de cada situación de la mina, se utiliza un método diferente. Pero tienen unos puntos comunes. En las explotaciones subterráneas deben establecerse talleres de mantenimiento, accesos principales, redes de agua y electricidad, drenajes, redes de iluminaciones, oficinas, comedores, baños, policlínicos, bodegas, etc. Todas estas son importantes y diferentes comparadas con las de una explotación a cielo abierto.

Especialmente el establecimiento de ventilación es más importante. Su objetivo es conducir aire fresco, captado desde la superficie por grandes extractores, hacia los lugares donde se están trabajando, y retirar el aire contaminado por los gases de voladura y de equipos diésel para expulsarlo a la superficie. Si la mina está en la zona ventosa, se podrá utilizar el aire natural para que se use menos el ventilador.

2.3.3 Fundición y Refino

El cobre blíster (Blister copper) (alrededor de 98% o 98,5% de Cu) no es suficiente para aplicaciones eléctricas, se necesita tratar más. La refinación de fuego (los procesos pirometalúrgicos) es una técnica vieja, similar al convertidor Bessemer en el que el aire se sopla a través del cobre y el flujo se añade para eliminar las últimas impurezas. El primer aire se sopla para oxidar cualquier azufre residual. El exceso de oxígeno se elimina por Poling´ con madera que se descompone en productos carbonosos que al mismo tiempo se oxidan rápidamente. En el presente, se utilizan mucho el gas natural, hidrógeno o amoníaco para este propósito. La mayoría de los productos se lanzan en ánodos (>99,5 % de Cu) y después se envía a una refinería electrolítica. Debido a su calidad suficientemente alta, la pirometalurgia podrá ser utilizada para aleaciones y para piezas fundidas especiales.

El cobre más puro se obtiene por un proceso electrolítico (Hidrometalurgia), llevado a cabo utilizando un bloque de cobre impuro como ánodo y una lámina delgada de cobre puro como cátodo. El electrolito es una solución ácida de sulfato de cobre. Al pasar electricidad a través de la celda, el cobre se disuelve desde el ánodo y se deposita en el cátodo. Las impurezas se quedan en solución o bien permanecen en el lodo insoluble.

Hidrometalurgia del Cobre

Generalmente los métodos de hidrometalurgia se utilizan son los siguientes: 1. Intec. 2. CESL. 3. Dynatec. 4. Activox. 5. BacTech. 6. BioCOP. 7. Oxidación a presión total. Todos estos procesos se llevan a cabo en las diferentes etapas del desarrollo y la gran cantidad de datos disponibles en la literatura varían de un proceso a otro, además, los datos no son muy detallados para cualquiera de los procesos. Las condiciones de operación típicas para los siete procesos hidrometalúrgicos considerados en el estudio se comparan en la Tabla 2.7 y las breves descripciones de los procesos se dan en las siguientes secciones.

Tabla 2.7 Condiciones de operación típicas para procesos hidrometalúrgicos

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Aire u oxígeno	Lixiviación autoclave	Hervir caliza	Cianuración
Intec	85	101(atm)	Aire	No	No	No
CESL	150	1480	O ₂	Sí	No	Sí
Dynatec	150	1675	O ₂	Sí	Sí	Sí
Activox	100	1000	O ₂	Sí	Sí	Sí
Oxidación PT	220	3000	O ₂	Sí	Sí	Sí
BacTech	45-85	101	Aire	No	Sí	Sí
BioCop	45-85	101	Aire	No	Sí	Sí

1. Intec

El proceso Intec esencialmente consiste tres circuitos secuenciales de lixiviación, purificación y extracción electrolítica. Un diagrama de flujo simplificado de los procesos se muestra en la Figura 2.19. La sección de lixiviación es de configuración a contracorriente de tres o cuatro etapas y opera a 85 °C y a presión atmosférica. El concentrado de cobre (después de remolerse) se alimenta a la etapa uno y el lixiviado se alimenta a la etapa cuatro. El oro se disuelve en las etapas tres y cuatro, luego se recupera sobre un filtro de carbono (La Cianuración del residuo de proceso no es necesario). El residuo de lixiviación se lava en un filtro antes de descargarlo del circuito. Los datos de consumo de energía proporcionados por Intec para este estudio de ACV se basaron en una previsión conservadora en el que cuatro etapas de lixiviación serían necesarias.

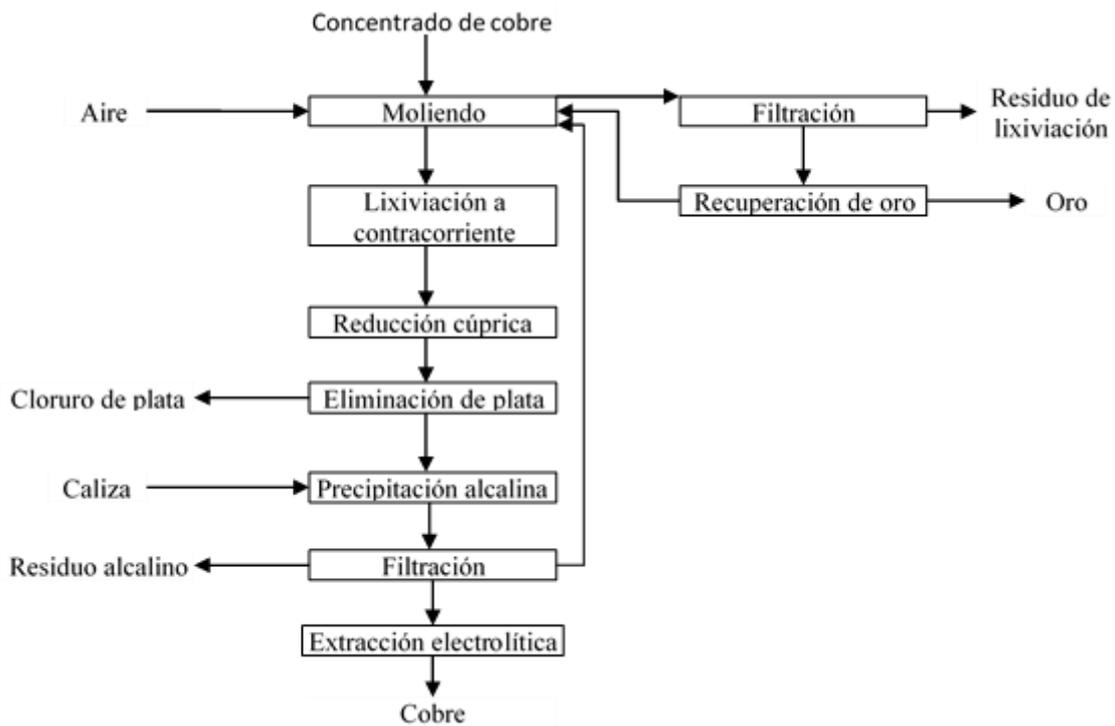


Figura 2.19 Diagrama de flujo de Intec

Antes de la extracción electrolítica, el electrolito del circuito de lixiviación se purifica en un sistema de tres etapas. La primera etapa consiste en la reducción de los iones cúpricos residuales a los cuprosos mientras que la segunda etapa incluye la adición de mercurio y cobre soluble (los dos son reciclados) para eliminar la plata como una amalgama que se trata posteriormente para producir producto de plata. En la tercera etapa, las impurezas tales como hierro, indio y bismuto se precipitan por la adición de caliza.

La electrodeposición consiste en la recuperación del metal de cobre en forma de dendritas del cobre a partir de un electrolito que contiene iones cuprosos (Cu^+) en una celda particular de electrodeposición. Este proceso va acompañado de la recuperación simultánea del líquido de lixiviación. El lixivante contiene el ion de bromo-cloruro (BrCl^{2-}). Las dendritas de cobre se lavan y se secan bajo una atmósfera inerte, a continuación, se funden en un horno purgado de inducción y es fundido en lingotes o en otras formas.

2. CESL

Este proceso está siendo desarrollado y comercializado por Servicios de Ingeniería de Cominco (Cominco Engineering Services, CESL), una subsidiaria de Cominco, y se ha probado en una escala de la planta piloto (36 kg Cu/d) y otra de la planta de demostración (1-1.5 t Cu/d). El proceso contiene una operación de lixiviación de dos etapas como se ha mostrado en el diagrama de flujo en la Figura 2.20.

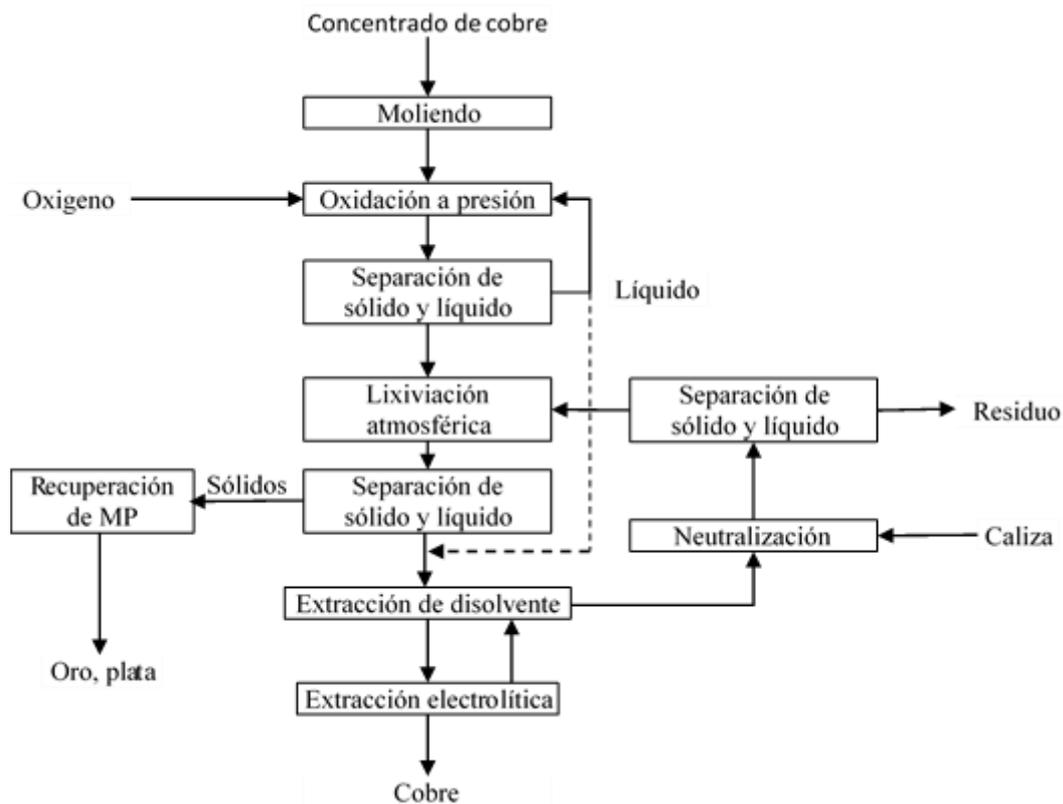


Figura 2.20 Diagrama de flujo de CESL

En la primera etapa, el concentrado remolido del cobre remolido se lixivia en una autoclave, usando oxígeno de alta presión y una mezcla lixivante de sulfato y cloruro. Las condiciones lixiviadas se dan a una bajo la temperatura de 150 °C y bajo una presión de 1480 kPa. La oxidación a alta presión convierte todos los sulfuros de cobre en sulfatos básicos de cobre soluble en ácido. La siguiente etapa es la filtración.

La torta de filtro de la etapa anterior se lixivia a presión atmosférica en el ácido diluido. Este ácido se obtiene a partir del circuito de la extracción de solvente para disolver los sulfatos básicos de cobre. A continuación, la suspensión de lixiviación atmosférica se separa en sólido y líquido usando unos circuitos de decantación a contracorriente. Los sólidos separados (residuo de lixiviación) van a la recuperación de metales preciosos, mientras que con la solución rica en cobre se procede a la extracción de disolvente, luego va a la extracción electrolítica convencional en el medio sulfato. El diagrama de flujo de recuperación de metales preciosos propuesta por Jones (1999) no incluye un pretratamiento de hervir cal antes de la cianuración, así que fue omitido en el estudio de ACV. La evaporación de agua se lleva a cabo para mantener un balance de agua en la oxidación a alta presión.

3. Dynatec

Este proceso está siendo desarrollado y comercializado por la División de Tecnologías Metalúrgicas de la Corporación de Dynatec. Se ha probado en la planta piloto y

miniplanta (2-5 kg Cu/h). El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.21, el concentrado de cobre y los sólidos reciclados de la torta de sulfuro se remuelen y se tratan bajo una temperatura y presión elevada (150 °C, 1675 kPa) en una oxidación a alta presión para así disolver cobre.

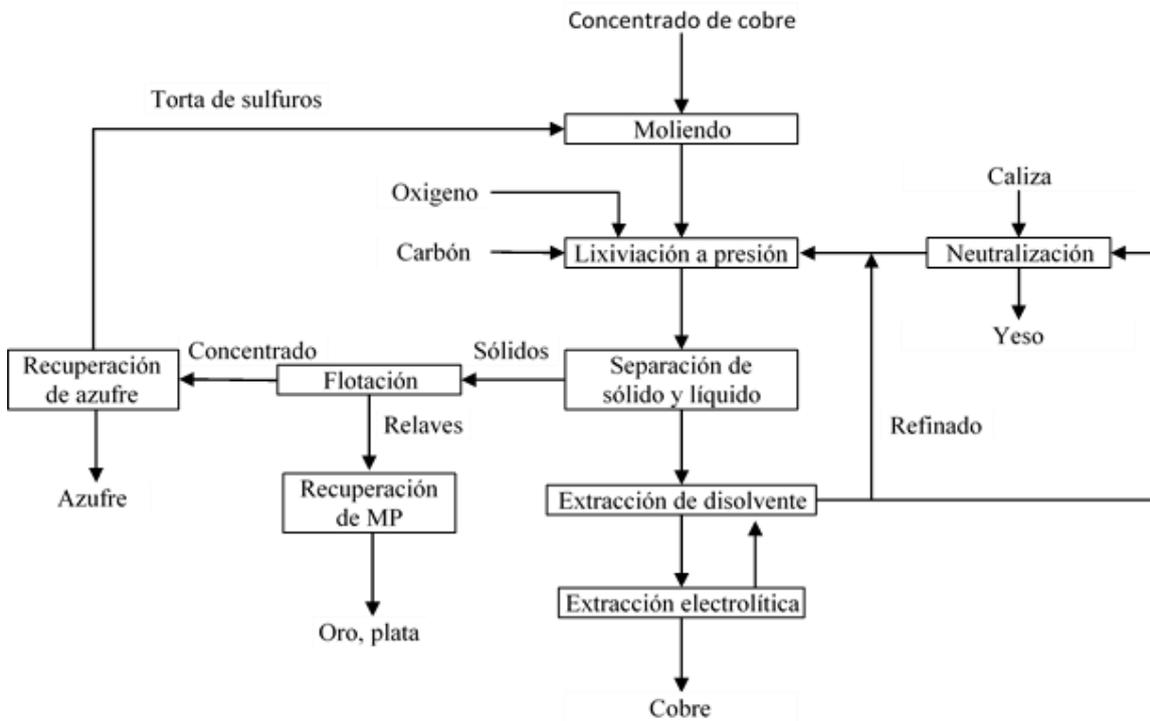


Figura 2.21 Diagrama de flujo de Dynatec

El carbón se añade como un surfactante para eliminar el líquido contenido azufre elemental de las superficies de los sulfuros sin reaccionarse. La suspensión se descarga por la lixiviación a presión. A continuación, se procede a la separación de sólido y líquido. Y se procede a la extracción de disolvente de la solución rica en cobre, luego va a la extracción electrolítica.

A través de flotación, el residuo separado de lixiviación produce un concentrado de sulfuro y sulfato y algunos óxidos. El concentrado de azufre procede a la recuperación de azufre (fusión y filtración), y la torta de sulfuro filtrado se recicla a la lixiviación a alta presión. Los relaves se utilizan para la recuperación de los metales preciosos, tales como oro y plata, por la cianuración. Sobre todo, añadir caliza puede mejorar la recuperación de plata.

Buban y Collins (1997) no solo indican que puede ser posible recuperar cobre de la solución por la extracción electrolítica directa (es decir, no hace falta extraer disolventes), sino que también sugieren que una manera alternativa incluiría la extracción de disolvente.

4. Activox

Este proceso está siendo desarrollado y comercializado por Western Tecnología Mineral Pty. Ltd. Y ha sido probado en la planta de demostración (hasta 50 kg /h). El diagrama de flujo de este proceso se muestra en la Figura 2.22.

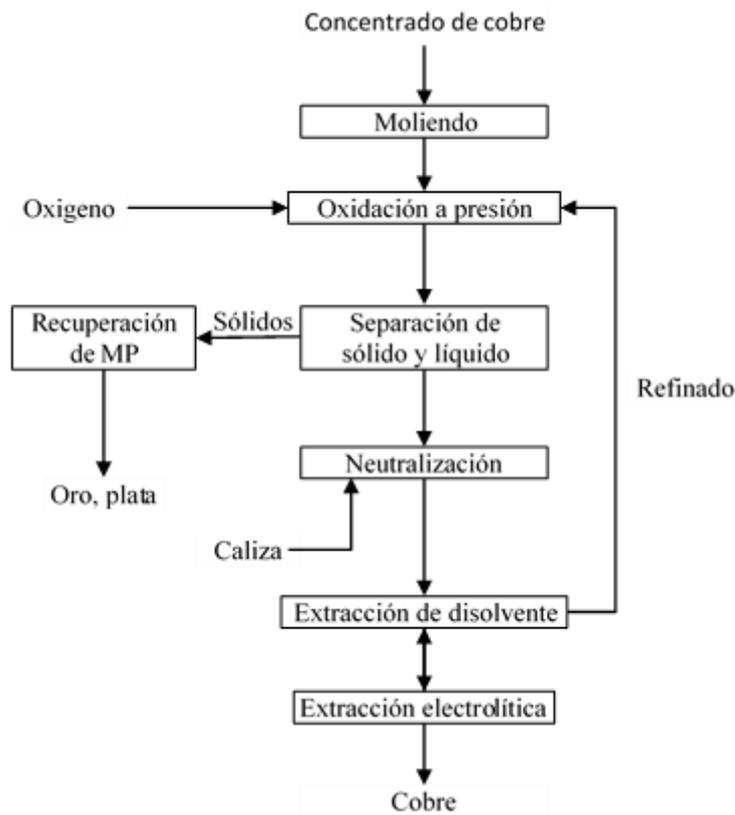


Figura 2.22 Diagrama de flujo de Activox

El primer paso del proceso Activox, es remoler el concentrado a un tamaño muy fino (7-15 μm) para que sea susceptible a la lixiviación a la temperatura usada aquí (típicamente 100 $^{\circ}\text{C}$). Esto es seguido por la lixiviación en la autoclave (a 1000 kPa) mediante el refinado como medio de lixiviación y añadiendo oxígeno.

El residuo de lixiviación se separa de la suspensión y se lava. El oro y la plata se obtienen por la cianuración del residuo. El exceso de ácido libre en la solución se neutraliza por la piedra caliza antes de la extracción de disolvente, a continuación, se procede a la extracción electrolítica.

5. BacTech

Este proceso está siendo desarrollado y comercializado por BacTech y su socio Mintek (la organización de investigación nacional de Sudáfrica) y es uno de los dos procesos de biolixiviación (el otro es el proceso BioCop, véase la sección siguiente) incluidos en este estudio. La biolixiviación de minerales (también conocidos como la oxidación bacteriana o bio-oxidación) se lleva a cabo por microorganismos de origen natural. Los microorganismos que se emplean en esta manera son termófilos moderados (45-60 $^{\circ}\text{C}$) o

termófilos extremos (60-85 °C). Los cultivos de termófilos desarrollados por BacTech se aislaron originalmente de una mina en el oeste de Australia. La puesta en marcha de una planta de demostración de 0,5 t se está terminando actualmente en las instalaciones de investigación de Industrias Peñoles en Monterrey, México.

El concentrado de cobre primero se remuele fino (5-15 µm) y luego se somete a la biolixiviación en unos tanques aireados agitados. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 2.23.

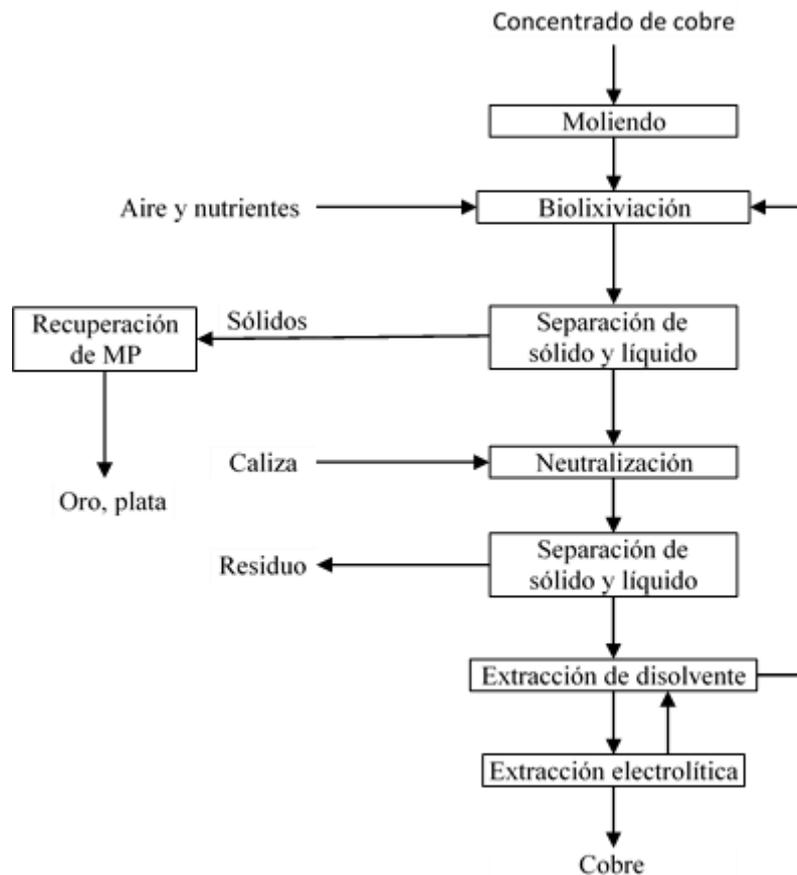


Figura 2.23 Diagrama de flujo de BacTech

Esto implica alimentar con una corriente continua del concentrado en suspensión a los reactores primarios, que contiene una suspensión de bacterias en un entorno ligeramente ácido. La mayor parte de la lixiviación tiene lugar en estos reactores. Cuando el concentrado se añade en los reactores primarios, el material parcialmente oxidado fluye en los reactores de la etapa secundaria donde se produce la oxidación final.

A continuación, el material lixiviado fluye desde los reactores secundarios en los tanques de espesantes para la separación de sólido y líquido, que se lleva a cabo normalmente en unos circuitos de decantación a contracorriente (CCD). El sólido va a la recuperación de metales preciosos después de lavarse. La solución de biolixiviación se neutraliza con caliza y los sólidos se eliminan mediante la separación. Finalmente la solución

neutralizada va a la extracción electrolítica. El refinado se recicla en los reactores de biolixiviación.

6. BioCOP

El proceso BioCOP está siendo desarrollado y comercializado por BHP/Billiton. Una planta piloto (70 kg/d) ha estado operando como un desarrollo conjunto entre Bioliton y Codelco en la operación de Chuquicamata en Chile desde finales de 1997.

El proceso BioCOP hace esencialmente lo mismo que el proceso de BacTech, pero utiliza una cepa diferente de bacterias. El diagrama de flujo se ha mostrado en la Figura 2.24. Es el mismo que el de la Figura 2.23. Sin embargo, los procesos específicos varían, dependiendo de la mezcla del concentrado y de la circunstancia local. Esto es cierto para todos los procesos considerados en la hidrometalurgia.

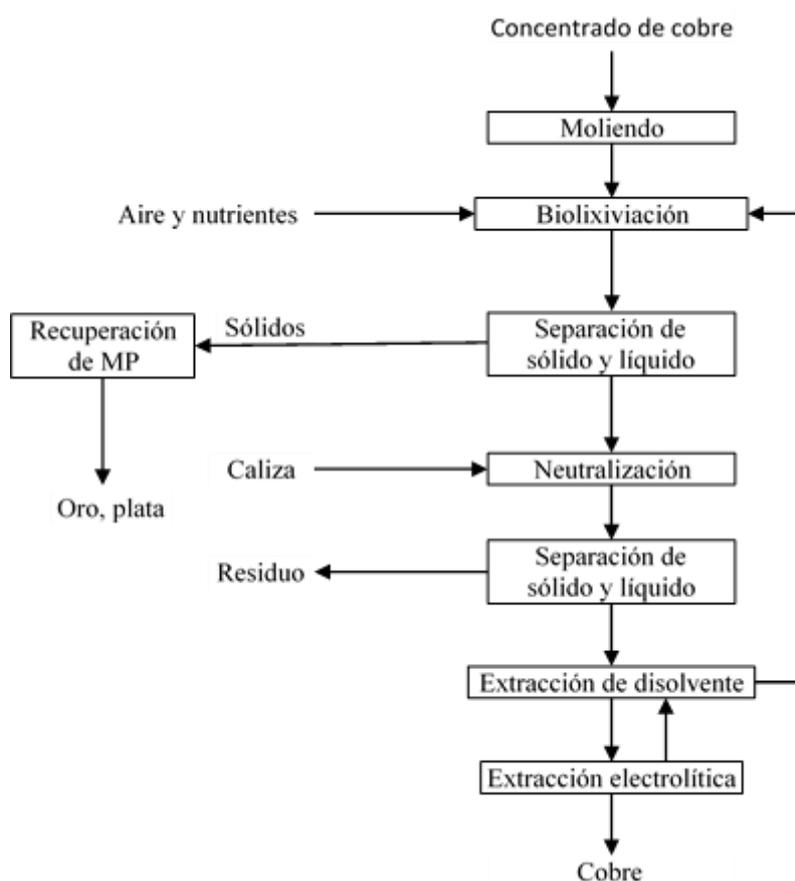


Figura 2.24 Diagrama de flujo de BiCOP

El proceso BioCOP generalmente incluye los siguientes pasos:

- El concentrado del sulfuro de cobre se oxida biológicamente en unos reactores donde hay los tanques agitados bajo una temperatura de 45 °C o 65-86 °C. Mientras que 10%-20% de los sólidos va a producir suspensión que contiene sulfato soluble de cobre.

- Separar sólido y líquido de la suspensión para producir una solución rica en cobre.
- Extraer disolvente de la solución para la siguiente extracción electrolítica.
- Reciclar al menos parte del refinado de la extracción para la etapa de biolixiviación.
- Recuperar metales preciosos de los sólidos lavados de biolixiviación.

7. Oxidación a presión total

Este proceso implica la oxidación completa del concentrado de cobre en una autoclave utilizando oxígeno a 220 °C y una sobrepresión de oxígeno de 690 kPa. Tal como muestra en la Figura 2.25. Se baja la presión de la suspensión de autoclave a la atmosférica. Luego se somete a la separación de sólido y líquido en unos circuitos de decantación a contracorriente (CCD) donde el residuo se lava para recuperar el cobre lixiviado a la solución de producto. La recuperación de cobre se hace en la solución débilmente ácida por la extracción electrolítica.

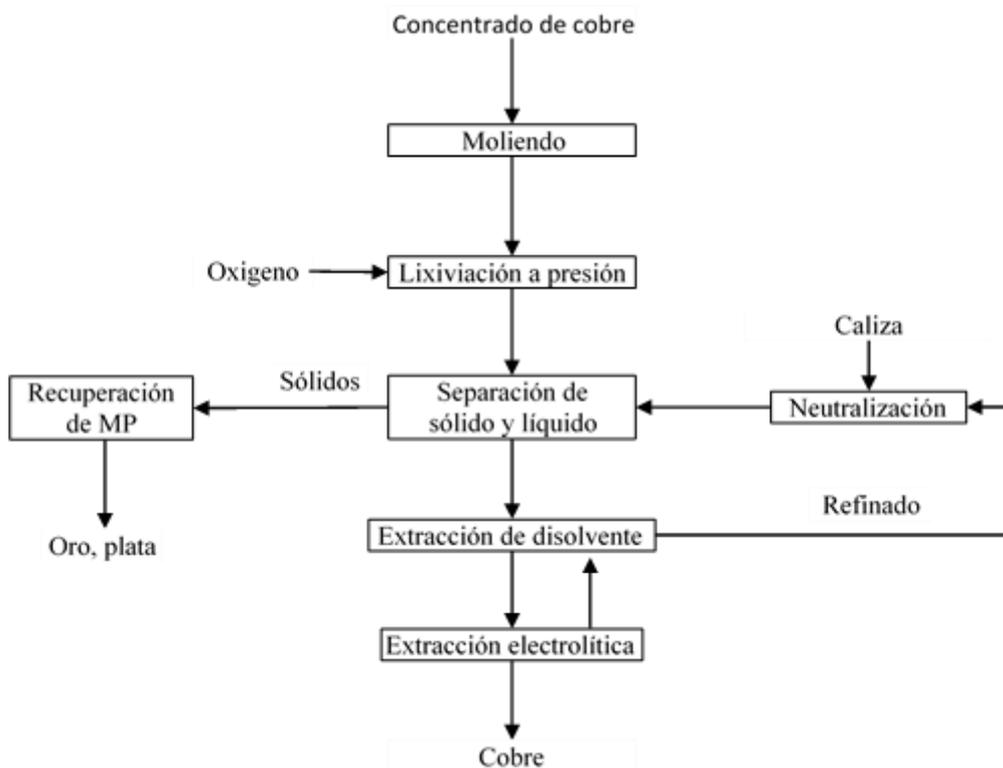


Figura 2.25 Diagrama de flujo de Oxidación a presión total

El residuo lavado de lixiviación va a la recuperación de metales preciosos (hervir caliza y cianuración). El refinado se neutraliza con caliza antes de ser reciclado al circuito lavado de CCD. Además, el uso de oxígeno y el mantenimiento de la alta temperatura para oxidar azufre son costoso, Dreisinger (1998) sugiere que este tratamiento de la oxidación a presión total puede ser deseable en algunas circunstancias seleccionadas.

Pirometalurgia del Cobre

La mayoría de los concentrados de sulfuros de cobre producidos en todo el mundo se tratan en los complejos de fundición y refinación. Aunque se ha desarrollado bien, aún tiene una serie de desventajas, tales como el alto costo de capital de las nuevas instalaciones y las preocupaciones ambientales sobre las emisiones de dióxido de azufre. A pesar de estos inconvenientes, la fundición es un proceso relativamente eficiente. Además, se ha hecho mejor en los últimos años, por ejemplo, la fusión flash. Para comparar con esas maneras hidrometalúrgicas mencionadas anterior, en este estudio, utilizamos la fusión flash como una representante de las maneras pirometalúrgicas.

El diagrama de flujo de la fusión flash se muestra en la Figura 2.26. El concentrado de cobre primero se seca y luego se introduce en el horno de fusión junto con el concentrado de escoria recirculada y material fundente. Los gases de escape del horno van a una caldera de calor residual, donde la temperatura de los gases se reduce de unos 1300 °C a 350-400 °C. La energía recuperada se utiliza para generar vapor de agua (60-70 atm). Después, se limpia en los precipitadores electrostáticos y una sección de lavado en húmedo antes de ir a la planta de ácido.

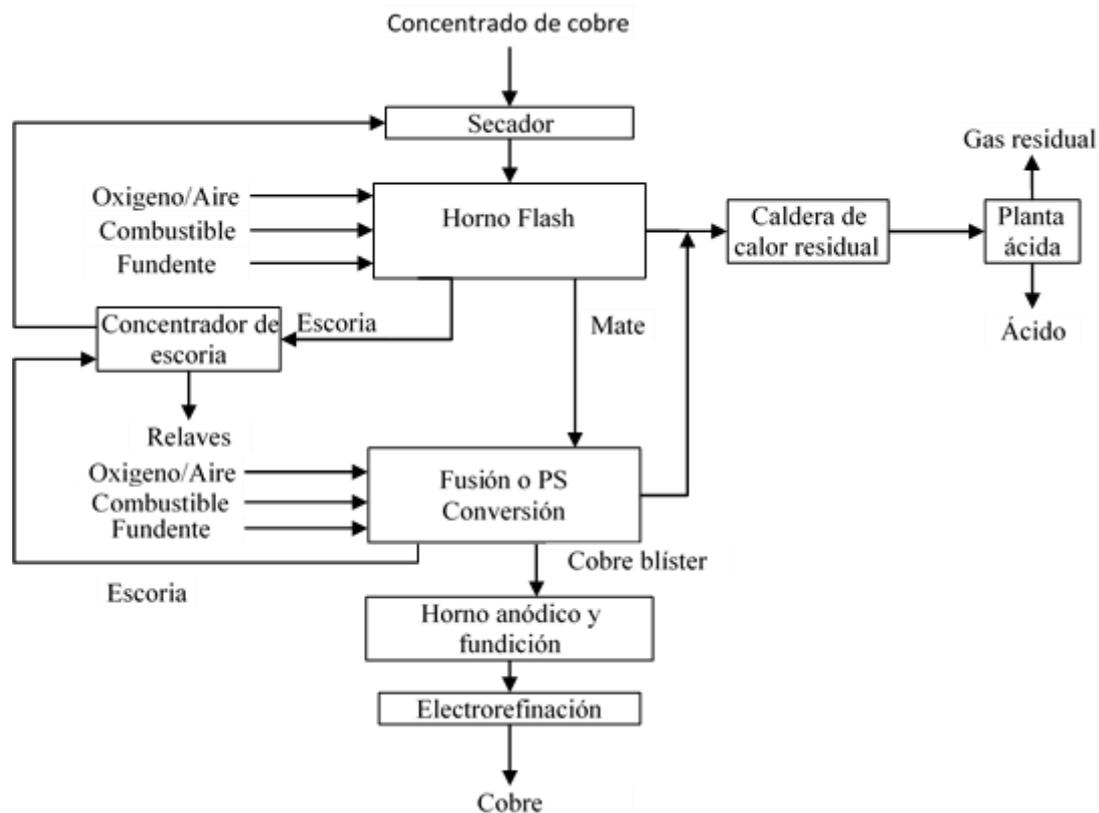


Figura 2.26 Diagrama de flujo de la Fusión Flash

El mate producido en el horno, contiene típicamente 60-65% Cu, se alimenta en el horno convertidor junto con el fundente. Aire enriquecido con oxígeno se utiliza en este horno así como en el horno flash. Los gases de escape del horno convertidor se trata de una manera similar a la del horno flash. La escoria junto con la del horno flash van al concentrador de escoria y después se recirculan al horno flash.

El cobre blister desde el horno convertidor se alimenta a un horno de ánodo en el que el azufre se oxida en un período corto de oxidación. Finalmente el oxígeno del cobre anódico se reduce utilizando gas natural antes de la fundición de los ánodos. El cobre anódico pasa por la electrorefinación para producir cobre refinado (99,9% de cobre).

2.4 Minería sostenible del cobre

El cobre es una materia prima totalmente reciclable y por lo tanto una fuente renovable para nuestro futuro. Siendo el cobre prácticamente indestructible, permite ser totalmente reciclado sin perder ninguna de sus prestaciones.

Cuando los productos de cobre llegan al final de su vida útil, el metal sigue manteniendo íntegras sus propiedades físico-químicas y puede por lo tanto ser totalmente reciclado para convertirse otra vez en una nueva materia prima, contribuyendo de este modo a preservar los recursos naturales mundiales.

Se estima que aproximadamente un 80% del cobre explotado a lo largo de la historia está todavía hoy en uso, después de haber sido refundido y transformado en diversas ocasiones, contribuyendo a conservar los recursos minerales disponibles.

Para destacar la importancia del reciclaje cabe recordar que:

1. El cobre es un metal reciclable al 100%.

La óptima organización actual en el circuito de reciclaje de productos de cobre (con una amplia red de puntos de colecta) junto con el alto rendimiento del material reciclado resultante, contribuye al éxito de la recuperación y reutilización del cobre, siendo uno de los metales más reciclados. En Europa, el porcentaje de recuperación de cobre a partir de productos al final de su vida útil y reutilizada en procesos productivos, se estima en un 70% del total potencial disponible.

2. El cobre reciclado tiene las mismas características químicas, físicas y tecnológicas que el cobre primario. En consecuencia, no sufre ni pérdidas de rendimiento ni tiene limitaciones para ser reutilizado.

3. La producción europea de semielaborados de cobre proviene en un 50 % de productos reciclados.

El reciclaje de chatarra constituye un elemento fundamental en la producción de semielaborados de cobre: exceptuando el alambro, su peso en la producción de semielaborados de cobre es equiparable al de la materia prima virgen (cátodos), alrededor de un 50%, siendo en algunos sectores aún más elevado; en el caso de las barras de latón, la chatarra puede suponer hasta un 80-90% del total de la materia prima utilizada.

4. Los desechos de cobre son una fuente de recursos

El reciclaje del cobre permite ahorrar un 85% de la energía necesaria para producir el metal primario (fuente: Bureau of International Recycling)

5. Reciclar ayuda al medio ambiente

Ya que permite reducir:

- Las emisiones ligadas a procesos de extracción y refinado del cobre primario
- El volumen de desechos sólidos y los costes y problemas derivados de su eliminación

5. El cobre recuperado es “la auténtica mina de Europa”

La recuperación compensa la falta de minas de cobre en Europa y por tanto la dependencia de nuestra industria de las importaciones de materia prima. Los productos que utilizamos a diario contienen millones de toneladas de cobre que podrá ser reutilizado al final del

ciclo de vida de los mismos, convirtiéndose en un nuevo recurso disponible para nuestro futuro.

6. Material reciclado

Debido a que el metal recuperado proviene de desechos de fabricación de productos semielaborados (y no del metal contenido en el material en desuso), se establece una fuerte sinergia entre los fabricantes de semielaborados y las industrias que los utilizan, que tiene como resultado un sistema más competitivo.

3 Metodología

3.1 Análisis de ciclo de vida

Desde la perspectiva de los negocios sustentables, un análisis de ciclo de vida (LCA en inglés) es una herramienta de diseño con la que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia. En el caso del cobre, se incluye exploración, extracción, fundición y producción etc.

El análisis del ciclo de vida (ACV), también llamado evaluación del ciclo de vida (ECV), es una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción. Con el auge del ecodiseño, este enfoque ha ido integrando con más frecuencia diferentes criterios y parámetros de evaluación del impacto ambiental.

En este proceso, se evalúa el impacto potencial sobre un producto, procesos o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación de los recursos (entradas) y emisiones ambientales (salidas). Generalmente, consideramos varias partes tales como el suministro de las materias primas necesarias para fabricar, transporte de materias primas, la fabricación de intermedios y, por último, el propio producto, incluyendo envase, la utilización del producto y los residuos generados por su uso.

El ciclo de vida de un producto (como un lingote de cobre) o una actividad (refinar cobre) está formado por dos tipos de sistemas, que revisten un interés especial para los evaluadores ambientales. Los estudios de ACV se realizan con la finalidad de responder a determinadas preguntas, y son esas preguntas las que conforman el diseño del estudio. Una de estas preguntas podrá ser: ¿Qué diferencia existe entre el posible impacto ambiental de un producto nuevo y otros productos ya existentes en el mercado?

Los productos de cobre producen impactos en el medioambiente a lo largo de todas las etapas de su vida útil, comenzando por la extracción de las materias primas y su transporte, el consumo de energía necesario para la fundición y refinado, los movimientos de tierra, consumos energéticos y residuos que se producen durante la fabricación de los productos, su mantenimiento y finalmente su reciclaje, así como la disposición final de todos sus elementos al final de su vida útil. Además, todas estas etapas de la vida del cobre están fuertemente interrelacionadas, de modo que los impactos en una de las etapas condicionan los impactos de las etapas siguientes.

A pesar del elevado impacto energético y ambiental que presenta el cobre en su fase de uso, es imprescindible también analizar el resto de fases del ciclo de vida, con el objetivo de poder contemplar todas las oportunidades de mejora, tanto actuales como futuras. En este sentido, hay que tener en cuenta que la aplicación del actual marco normativo forzaría necesariamente una disminución de los impactos en la etapa de uso del cobre, aumentando

el peso relativo de las restantes etapas que forman parte del ciclo de vida del cobre, especialmente en lo referente al impacto de las etapas de fundición.

Por todo ello, la reducción del impacto medioambiental del cobre requiere la aplicación de metodologías de evaluación de impacto adecuadas, de carácter global, y que incluyan todas las etapas de la vida de la producción de cobre.

Según la Comisión Europea [COM (2003) 302; COM (2005) 666; COM (2005) 670 y COM (2008) 397], en la actualidad, la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye el mejor marco disponible para evaluar los impactos ambientales potenciales de cualquier tipo de actividad, producto o servicio sin límites geográficos, funcionales o temporales, ya que se examinan todos los procesos seguidos por las materias primas, desde su extracción, transformación y uso hasta su retorno a la naturaleza en forma de residuos (Ver en la Figura 3.1). Por tanto, una ventaja clara del ACV es que permite detectar situaciones en las que un determinado producto o un servicio parecen más ecológico que otro simplemente porque transfiere cargas ambientales a otros procesos o zonas geográficas, sin que se produzca una mejora real desde el punto de vista global.



Figura 3.1 Ciclo de vida de un producto

En fin, el ACV permite dar una respuesta clara para cada etapa de la producción de cobre, a cuestiones tales como: ¿qué estructura es más respetuosa con el medioambiente cuando hace la extracción subterránea?, ¿qué fuentes energéticas son las más adecuadas?, ¿en cuánto se reduce el impacto medioambiental al instalar sistemas renovables como plantas

de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores de alta potencia y central nuclear?, ¿qué objetivos medioambientales es posible plantear para la producción de cobre? y ¿cuál es el grado de cumplimiento de dichos objetivos medioambientales?

La metodología general del ACV consta de cuatro fases, si bien es posible realizar estudios simplificados, en los que se elimine alguna de ellas:

1. Definición de objetivos y alcance, donde se establece la finalidad del estudio, los límites del sistema a evaluar, los datos necesarios y otras hipótesis.
2. Análisis de inventario, donde se cuantifican todos los flujos de energía y de materiales que entran y salen del sistema durante todo su ciclo de vida.
3. Evaluación de los impactos ambientales derivados de los flujos de energía y materiales recopilados en el inventario y que son clasificados según los efectos ambientales que pueden generar.
4. Interpretación, donde los resultados de las fases precedentes son analizados conjuntamente, en consonancia con los objetivos del estudio, con objeto de establecer las conclusiones y recomendaciones finales.

3.2 Introducción a SimaPro

SimaPro es una herramienta profesional para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación al ecodiseño, al desarrollo de ecoetiquetas, al cálculo de huellas de carbono o huellas hídricas, entre otros. Es el software de Análisis del Ciclo de Vida de referencia en todo el mundo, con usuarios en más de 60 países y desarrollado por la consultora holandesa Pré Consultants. Tiene las siguientes características:

1. Interfaz de usuario intuitiva basada en las fases de desarrollo de un ACV según la metodología ISO 14040 para la evaluación de los impactos medioambientales de un producto o proceso.
2. Amplias funcionalidades de análisis:
 - Fácil identificación de oportunidades de mejora de productos o procesos gracias a la posibilidad de evaluar los impactos de las diferentes etapas del modelo y su contribución al impacto global.
 - Comparativa entre varios productos o procesos.
 - Obtención de resultados gráficos (diagramas de barras, de flujos, de árbol, etc.) y resultados numéricos en forma de tabla exportables a Excel.
 - Amplias opciones de filtrado para la visualización de los resultados.
3. Opciones avanzadas:
 - Enlace directo con Excel u otras aplicaciones externas.

- Uso de parámetros para el análisis de diferentes escenarios.
 - Evaluación de incertidumbre de los resultados mediante análisis de MonteCarlo.
4. Adaptabilidad: el usuario puede incluir nuevas metodologías de evaluación o adaptar las existentes, así como incluir o modificar datos de productos o procesos según las necesidades, con datos propios o con datos de bases de datos de referencia.
5. Evaluación socio-económica: complementario a la evaluación ambiental, el programa permite realizar estudios Life Cycle Costing y Social-ACV. Análisis de los impactos económicos y sociales de un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida.

En este estudio, utilizamos SimaPro como una herramienta del análisis de ciclo de vida del cobre.

3.3 Metodología

ReCiPe es el sucesor de los métodos Eco-indicador 99 y CML-IA. El objetivo al inicio del desarrollo era integrar el “método orientado a los problemas” de CML-IA y el “método orientado a los daños” de Eco-indicador 99. El “método orientado a los problemas” define las categorías de impacto a nivel del punto medio. En este método la incertidumbre de los resultados es relativamente baja. El inconveniente de esta solución es que las categorías diferentes de impacto hacen que las conclusiones de los resultados obtenidos sean más complicadas. El “método orientado a los daños” solo resulta en tres categorías de impacto, que hacen que la interpretación de los resultados sea más sencilla. Sin embargo, la incertidumbre en los resultados es mayor. ReCiPe implementa los dos de ellos como tantos puntos medios (orientado a los problemas) y tantos puntos finales (orientado a los daños). Los factores de la caracterización de punto medio se multiplican por los factores de los daños para conseguir los valores de la caracterización de punto final.

ReCiPe comprende dos conjuntos de las categorías de impacto asociados con los factores de caracterización. A nivel del punto medio, tiene 18 categorías de impacto:

1. Agotamiento del ozono
2. Toxicidad humana
3. Radiación ionizante
4. Formación de oxidantes fotoquímicos
5. Formación de partículas
6. Acidificación terrestre
7. Cambio climático
8. Ecotoxicidad terrestre
9. Ocupación del suelo agrícola
10. Ocupación del suelo urbano
11. Transformación del suelo natural

12. Ecotoxicidad marina
13. Eutrofización marina
14. Eutrofización del agua dulce
15. Ecotoxicidad del agua dulce
16. Agotamiento de los combustibles fósiles
17. Agotamiento de los minerales
18. Agotamiento del agua dulce

A nivel del punto final, la mayoría de estas categorías de impacto del punto medio se multiplican por los factores de daños y agregan a tres categorías del punto final.

1. La salud humana
2. Ecosistemas
3. Costos excedentes de recursos

Las tres categorías del punto final se normalizan, se ponderan, y agregan en una sola puntuación. La Figura 3.2 enseña las relaciones entre los parámetros de los inventarios del ciclo de vida (el lado izquierdo), las 18 categorías del punto medio (centro), las 3 categorías del punto final, y la puntuación individual (lado derecho).

Demanda de Energía Acumulada

El método para calcular la demanda de energía acumulada (CED, Cumulative Energy Demand) se basa en el método publicado por Ecoinvent versión 1.01 y ampliado por PRé para los recursos energéticos disponibles en la base de datos de SimaPro.

Los factores de caracterización para los recursos energéticos se dividen en 5 categorías de impacto:

1. No renovables, fósiles
2. No renovable, nuclear
3. Renovables, la biomasa
4. Renovables, eólica, solar, geotérmica
5. Renovables, agua

La normalización no es una parte de este método. Con el fin de obtener la demanda de energía total, cada categoría de impacto se da el factor de ponderación 1.

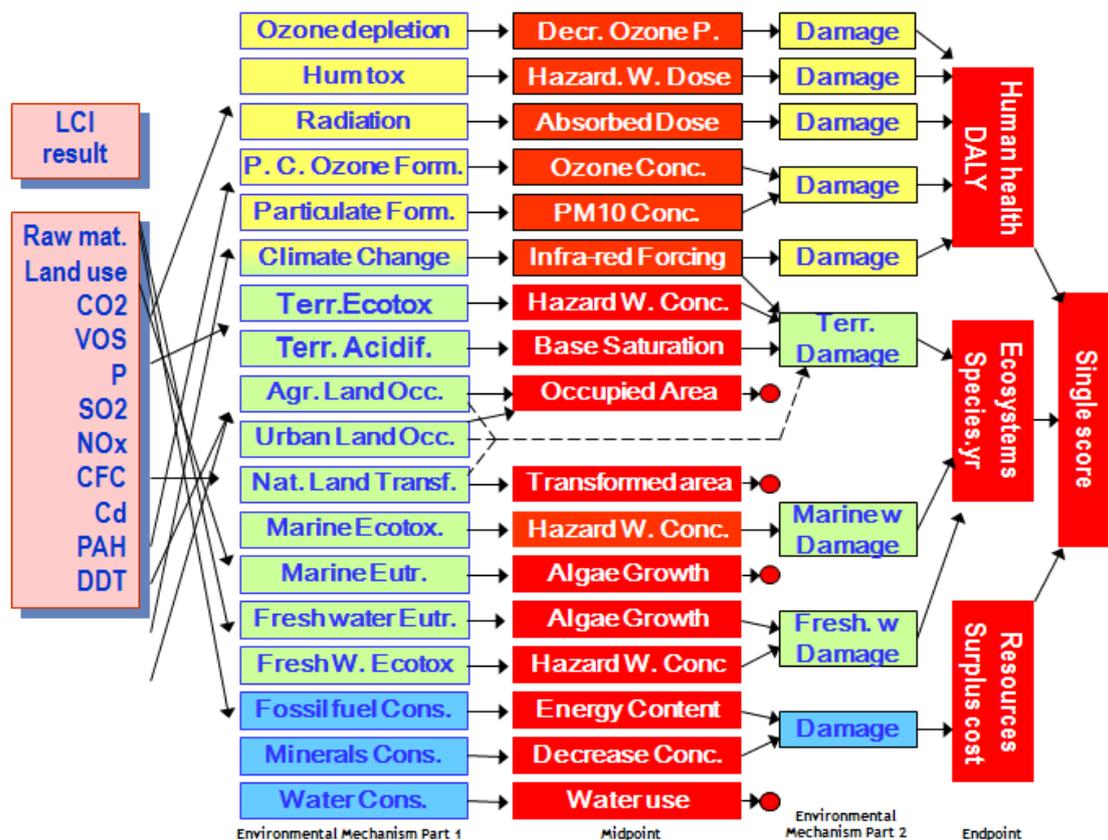


Figura 3.2 Relaciones entre los inventarios, las categorías del punto medio, las categorías del punto final y la puntuación individual (Fuente: SimaPro)

3.4 Alcance del estudio

Frontera del sistema

La frontera del sistema considerada fue desde la extracción del mineral de la tierra hasta la producción de cobre refinado. El proceso general se subdividió en las etapas de procesamiento que se indican a continuación. Las dos primeras etapas son comunes para todos los procesos de la producción de cobre, la última etapa se dividió en dos para la fundición:

- Extracción del mineral
- Mineralurgia
- Procesos metalúrgicos

Sin embargo, el producto de metal refinado del proceso Intec es en forma de dendritas de cobre, mientras que los productos de los otros procesos son en forma de láminas catódicas de cobre. Por lo tanto, los productos no son todos idénticos como lo requerido de la metodología de ACV.

Si el producto de Intec, dendritas de cobre, pudiera venderse sin tratamiento adicional, sería más probable que una fusión y fundición se necesitaran para que los productos fueran en las formas de las que tuvieran valor agregado. Por otra parte, la hoja de cobre catódico de los otros procesos (hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos) podría venderse en forma inalterada, pero aún requeriría fusión en algún momento. Debido a este problema, es mejor que se comparen los dos casos distintos (uno con fusión y otro sin fusión). Sin embargo, para que sea más sencillo la interpretación del estudio, se considera todos los casos con fusión.

Impactos ambientales

Las categorías de impacto ambiental informados para cada proceso considerado en el estudio fueron los 18 de ReCiPe, que han enseñado en la sección anterior. Además, el consumo total de energía también se informó para cada proceso.

Unidad funcional

La unidad funcional del estudio fue 1 kg de metal de cobre refinado, o 1 Pt (unidad de Eco-indicador). Los valores Eco-indicador estándar pueden ser considerados como cifras adimensionales. Como el nombre que usamos, el punto Eco-indicador (Pt). En las listas de Eco-indicador se utiliza generalmente el punto de mili unidad (mPt), y $1 \text{ mPt} = 0.001 \text{ Pt}$.

El valor absoluto del punto no es muy relevante ya que el propósito principal es para comparar las diferencias relativas entre los productos o componentes. La escala se elige de tal manera que el valor de 1 Pt representa una milésima de la carga ambiental anual promedio por habitante europeo.

Procesos considerados

Los ocho procesos considerados en la comparación de la ACV son:

1. Intec.
2. CESL.
3. Dynatec.
4. Activox.
5. BacTech.
6. BioCOP.
7. Oxidación a presión total.
8. Fusión flash

Las descripciones breves se han mostrado en la sección 2.3.3.

3.5 Supuestos e inventario

Los datos utilizados para cada procesos se verificaron con más de una fuente si es posible (T E Nrogate, 2001). El alcance, los datos, las hipótesis utilizadas de los procesos de producción de cobre se realizaron por CSIRO Minerale, y bajo los términos y condiciones de CSIRO Minerale Cotización N °32148 (02 de agosto 2001). Los datos y sus fuentes se resumieron en la Tabla 3.2.

Los siguientes supuestos se hicieron en la realización del estudio:

La mina y el concentrador están cerca, por lo tanto el transporte de mineral entre las dos instalaciones se puede ignorar.

La planta de procesamiento hidrometalúrgico se encuentra en o cerca del sitio de la mina, por lo tanto el transporte de concentrado entre las dos instalaciones se puede ignorar

Dado que aproximadamente la mitad de la producción de cobre del mundo se produce en las fundiciones integradas (Brook Hunt, 2000) que presumiblemente implica el transporte mínimo de concentrado. Sin embargo, la otra mitad se cotizan en el mercado mundial y se necesitan hacer el transporte de concentrado. Generalmente, se transportan por dos maneras: por tren o por mar. En este estudio, se supone que tiene 500 kilómetros por tren el proceso de fusión flash.

Electricidad se produce por varios fuentes, en el estudio se base en el promedio del abastecimiento del año 2014 en España. Se ha mostrado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Porcentaje de cada fuente de electricidad en España (REE, 2014)

Fuente de electricidad	Porcentaje
Energía hidroeléctrica	16,09%
Gas Natural Y Crudo	2,50%
Nuclear	21,51%
Energía eólica	19,13%
Importado	23,34%

En el proceso hidrometalúrgico cualquiera neutralización de ácido se ha hecho con caliza, no por ningún material de ganga que consume ácido posible.

Los datos de concentrado de cobre que se han usado en el estudio son:

25% Cu

30% S

0.01% Ag

0.001% Au

Tabla 3.2 Datos de inventarios utilizados en el estudio de ACV

Etapas	Procesos		Inventario			Referencia
Extracción			Diesel	0.002	t/t mineral	Molinia (1993), Westcott & Hall (1993)
			Electricidad	13	KWh/t mineral	Molinia (1993)
			Drenaje de minas	0.78	t/t mineral	Leahy (1993)
			La roca estéril	0.18	t/t mineral	Leahy (1993)
Molturación			Electricidad	31	KWh/t mineral	Various sources
			Medio de molturación	0.001	t/t mineral	Watters (1993)
Fusión de Cobre	Intec	Proceso	Caliza	160	kg/t Cu	Houllis (2001)
				133	kg/t S	
			Cal	20	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Ácido clorhídrico	10	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Ácido sulfúrico	10	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Nitrógeno	20	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Carbono	0,75	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Cloruro de sodio	20	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Bromuro de sodio	2	kg/t Cu	Houllis (2001)
			Aire	3340	kg/t S	Dreisinger (1998)
	Gas natural	73	kg/t Cu	Houllis (2001)		
	Electricidad	535	KWh/t Cu	Houllis (2001)		
		EW	Electricidad	1650	KWh/t Cu	Houllis (2001)
	CESL	Proceso	Caliza	320	kg/t S	Dreisinger (1998)
			Oxígeno	740	kg/t S	Dreisinger (1998), Jones & Hestrin (1998), Jones (1999)
			Ácido sulfúrico	33	kg/t Cu	Dreisinger (1998), Jones (1996)
			Ácido clorhídrico	1	kg/t Cu	Dreisinger (1998);
			Gas natural	5	kg/t Cu	Jones (1999)
			Electricidad	900	KWh/t Cu	Jones (1999), Dreisinger (1998), Jones (1996)
		Recuperación PM	Cal	61	kg/t Cu	Mean of Dynatech and Total Pressure Oxidation processes
Cianuro de sodio			9	kg/t Cu	Mean of Dynatech, Bactech, Activox and Total Pressure Oxidation processes	
Gas Natural			42	kg/t Cu	Jones (1999), Houllis (2000)	
Electricidad			200	KWh/t Cu	Jones (1999, 2001)	
	SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)	
	EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)	

Acivox	Proceso	Caliza Oxígeno Ácido sulfúrico Gas natural Electricidad	240 670 0 0 1900	kg/t S kg/t S kg/t Cu kg/t Cu KWh/t Cu	Dreisinger (1998) Dreisinger (1998) Evans (1999)
	Recuperación PM	Cal Cianuro de sodio Gas natural Electricidad	61 15 93 200	kg/t Cu kg/t Cu kg/t Cu KWh/t Cu	Mean of Dynatech and Total Pressure Oxidation processes Corrans et. al. (1995), Dreisinger (1998) Jones (1999), Houllis (2000) Jones (1999, 2001)
	SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)
	EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)
BacTech	Proceso	Caliza Aire Ácido sulfúrico Gas natural Electricidad	390 16360 0 0 1435	kg/t S kg/t S kg/t Cu kg/t Cu KWh/t Cu	Dreisinger (1998) Dreisinger (1998) Dreisinger (1998), Miller and Winby (1997)
	Recuperación PM	Cal Cianuro de sodio Gas natural Electricidad	61 10 93 200	kg/t Cu kg/t Cu kg/t Cu KWh/t Cu	Mean of Dynatech and Total Pressure Oxidation processes Miller (1999) Jones (1999), Houllis (2000) Jones (1999, 2001)
	SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)
	EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)
Dynatech	Proceso	Caliza Oxígeno Carbón Ácido sulfúrico Gas natural Electricidad	1180 1230 25 0 0 1088	kg/t S kg/t S kg/t Cu kg/t Cu kg/t Cu KWh/t Cu	Dreisinger (1998) Dreisinger (1998) Buban & Collins (1997) Dreisinger (1998), Houllis (2000)
	Recuperación PM	Cal Cianuro de sodio Gas natural	45 4 93	kg/t Cu kg/t Cu kg/t Cu	Collins et. al. (2000), Barta et. al. (1999) Collins et. al. (2000), Barta et. al. (1999) Jones (1999), Houllis (2000)

			Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (1999, 2001)	
		SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)	
		EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)	
	Oxidación a presión total	Proceso	Caliza	3420	kg/t S	King & Dreisinger (1995)	
			Oxígeno	2200	kg/t S	Dreisinger (1999), Dreisinger (1998), King & Dreisinger (1995)	
			Ácido sulfúrico	0	kg/t Cu		
			Gas natural	0	kg/t Cu		
			Electricidad	1675	KWh/t Cu	Dreisinger (1998), Houllis (2000)	
		Recuperación PM	Cal	77	kg/t Cu	Dreisinger & Saito (1999), King & Dreisinger (1995)	
			Cianuro de sodio	6	kg/t Cu	King et. al. (1993), King & Dreisinger (1995)	
			Gas Natural	93	kg/t Cu	Jones (1999), Houllis (2000)	
			Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (1999, 2001)	
			SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)
			EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)
	BioCOP	Proceso	Caliza	2390	kg/t S	Dreisinger (1998)	
			aire	16360	kg/t S	Dreisinger (1998)	
			Ácido sulfúrico	0	kg/t Cu		
			Gas natural	0	kg/t Cu		
Electricidad			1667	KWh/t Cu	Dreisinger (1998)		
Recuperación PM		Cal	61	kg/t Cu	Mean of Dynatech and Total Pressure Oxidation processes		
		Cianuro de sodio	31	kg/t Cu	Loayza et al (1996)		
		Gas natural	93	kg/t Cu	Jones (1999), Houllis (2000)		
		Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (1999, 2001)		
		SX	Electricidad	200	KWh/t Cu	Jones (2001)	
		EW	Electricidad	2100	KWh/t Cu	Jenkins et al (1999)	
Fusión flash	Fusión y conversión	Gas natural	24	kg/t Cu	Kojo & Hanniala (2001), Houllis (2001), Krag (1993)		
		Carbón	17	kg/t Cu	Ishikawa (1998), Lee et al (1999)		
		Crudo	7	kg/t Cu	Kojo & Hanniala (2001), Gonzalez & Ruiz (1999)		
		Electricidad	1143	kg/t Cu	Kojo & Hanniala (2001), Houllis (2001)		
		Oxígeno	834	kg/t Cu	Various sources		
		silicon	130	kg/t Cu	Various sources		
		Caliza	21	kg/t Cu	Various sources		
	Refino	Electricidad	323	KWh/t Cu	Biswas & Davenport (1994), Houllis (2001)		
	Vapor	230	kg/t Cu	Houllis (2001), Norgate & Rankin (2000)			

La ley de mineral de cobre es 0.01.

La recuperación de cobre en el concentrador es 93,7% (MIM (1998))

La recuperación de plata a lo mejor no se incluye en el diagrama de flujo preferido por algunas empresas que desarrollaron procesos de la hidrometalurgia. Pero se ha incluido aquí para que sean comparable los procesos.

Un pretratamiento con cal en ebullición es necesaria para lograr una alta recuperación de plata por cianuración (Collins et. al. 2000)

Todos los procesos de biolixiviación requieren molienda fina. Así se puede alimentar concentrado a esos procesos para satisfacer la recuperación de cobre.

La recuperación de SO₂ en la fundición ácida es 99%.

4 Resultados y discusiones

Los diversos procesos de la hidrometalurgia considerados en este estudio se encuentran en las etapas diferentes del desarrollo. Por ejemplo, los datos disponibles en la literatura variaron mucho y no eran muy detallados para cualquiera de los procesos. Esto significaba que una serie de hipótesis y aproximaciones había que hacer para establecer una tabla de inventarios para cada proceso, sobre todo para las entradas de electricidad y combustibles fósiles. Además, los datos para los diferentes procesos eran específicos y fuertemente dependiente de la concentración de la mineralogía.

Por esta razón, se subraya que los resultados del ACV que se han presentado en este estudio no se deben considerar como los resultados definitivos de los diferentes procesos, sino más bien como las primeras estimaciones para los distintos procesos. Por lo tanto las clasificaciones relativas de los diversos procesos podrán cambiar cuando los datos de operación se puedan obtener más detallados o los procesos se desarrollen más. Además, todos los datos utilizados publicados o proporcionados por las diversas empresas para sus respectivos procesos se aceptaron por CSIRO Minerales

4.1 Resultado de ReCiPe

Tras simular la fabricación de cobre con el programa SimaPro, se obtienen fácilmente los resultados. En este estudio, para analizar el ciclo de vida del cobre se han usado dos metodologías, uno es ReCiPe y el otro es CED. El resultado de ReCiPe que se ha mostrado en la Figura 4.1.

Como se observa en la Figura 4.1, hay cinco impactos, representan el 97,2% de todos los impactos, que son mayores que los restos. El primero es el impacto del cambio climático y la salud humana (34,6%), seguido son agotamiento de fósiles (26,0%), cambio climático del medio ambiental (21,9%), formación de partículas (12,0%), toxicidad humana (2,6%). El cambio climático es una amenaza emergente considerable para la salud pública y modifica la manera en que debemos considerar la protección de las poblaciones vulnerables. Es decir, en la fabricación de cobre, tenemos que tener más cuenta en este impacto.

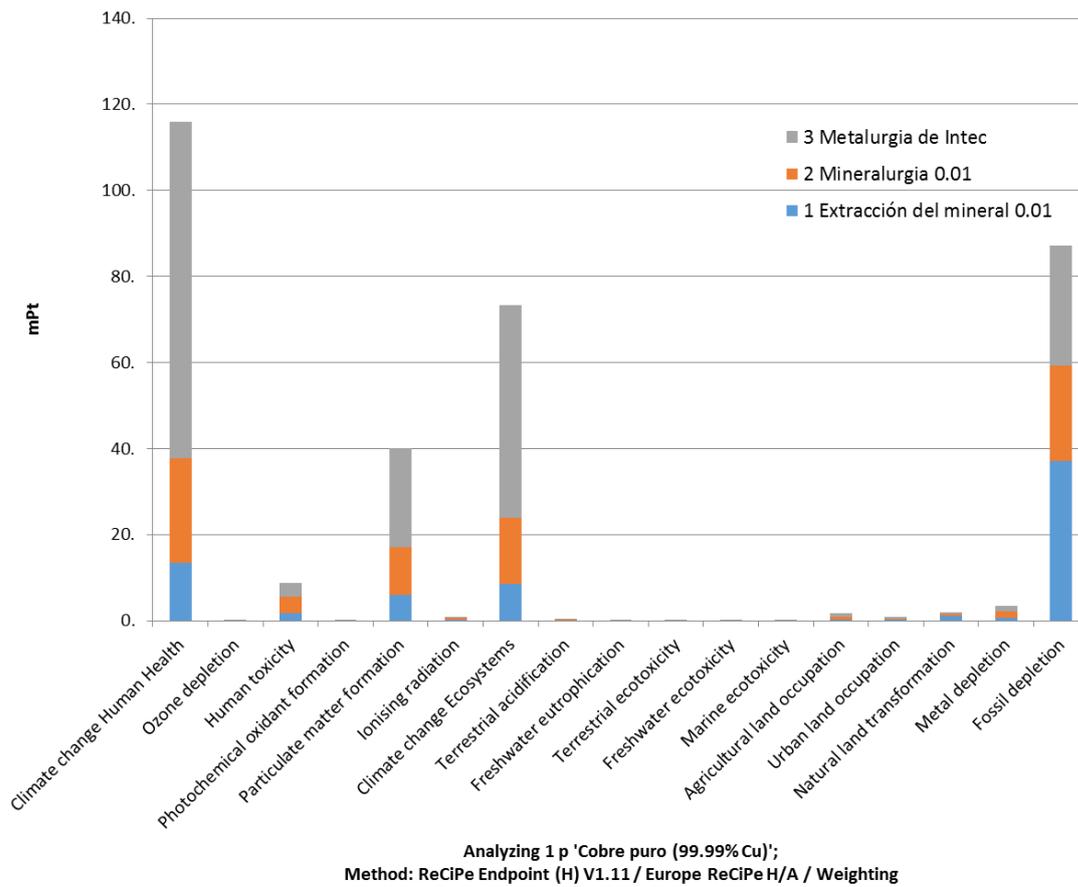


Figura 4.1 El resultado de ReCiPe

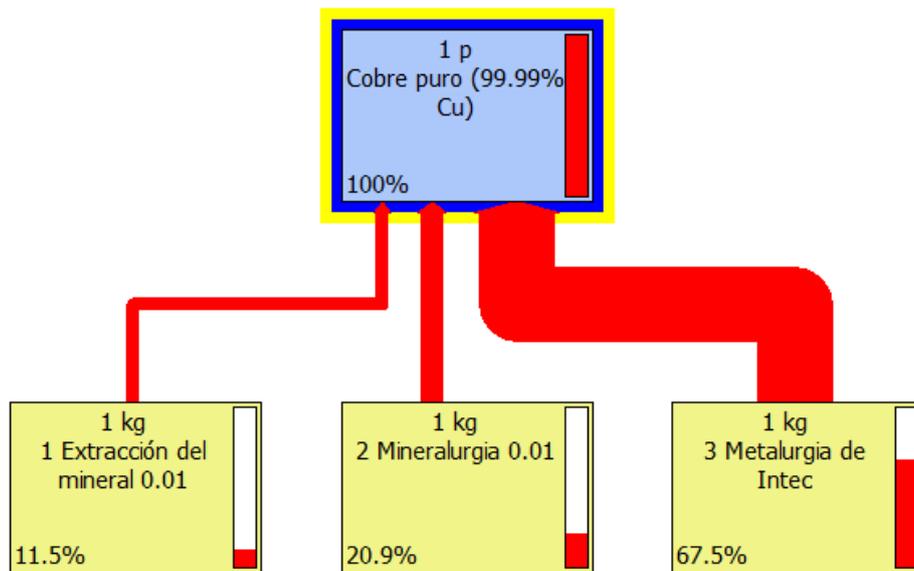


Figura 4.2 Flujo de la contribución de cada etapa (el cambio climático y la salud humana)

La Figura 4.2 muestra que en el impacto del cambio climático y la salud humana el proceso metalúrgico (proceso de Intec) contribuye el 67,5% del impacto total. El proceso de extracción del mineral representa el menos, solo el 11,5%. El mismo resultado se observa en la Figura 4.1.

Además, aunque en la Figura 4.1 presenta que normalmente el proceso metalúrgico representa más porcentaje del impacto. Pero en el de agotamiento de fósiles, se observa que la extracción del mineral representa más. Ya que en la extracción del mineral, se necesita más combustibles fósiles como el fuente de energía, tal como operaciones mecánicas.

4.2 Resultado de CED

Tras calcular el ciclo de vida del cobre por el método CED, se puede obtener todas las demandas de energía acumulada de cada etapa. El resultado se ha mostrado en la Figura 4.3. En este estudio, el cálculo de la demanda de energía se basa en la producción de una tonelada de cobre.

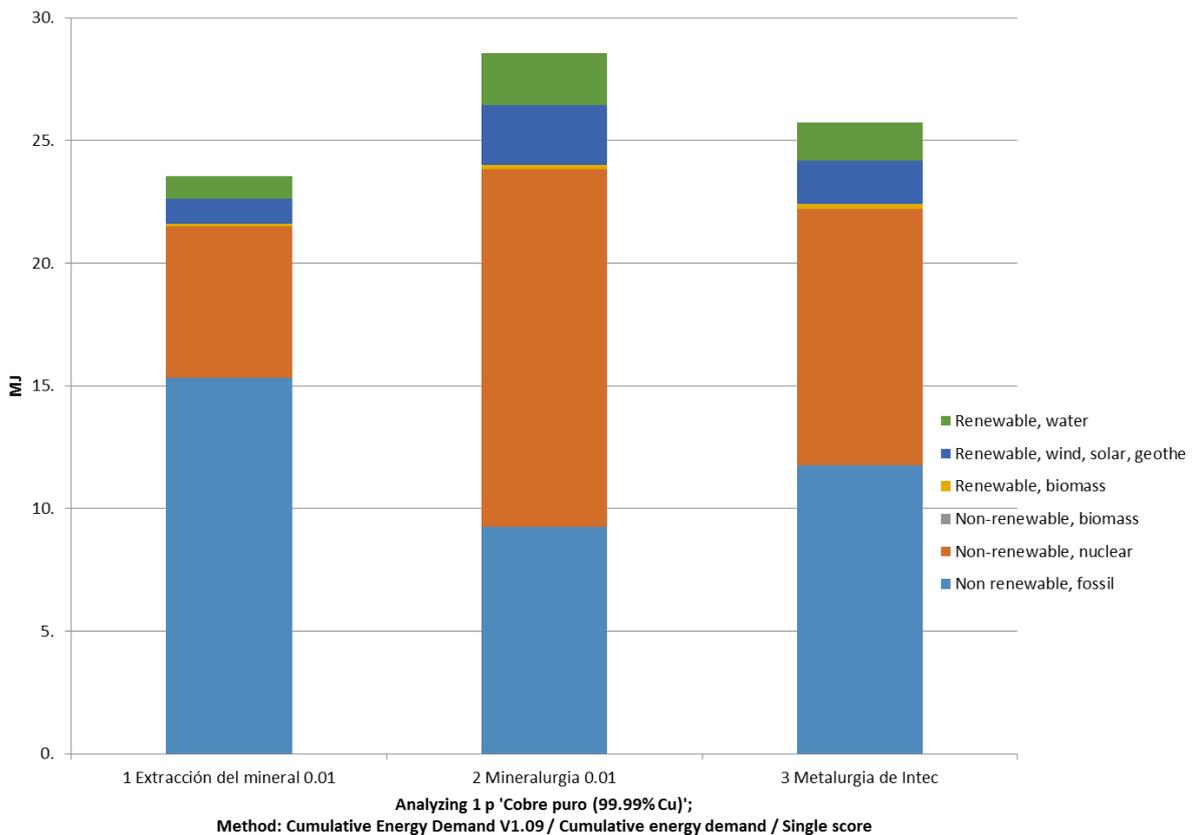


Figura 4.3 Demanda de energía acumulada de las principales etapas de la producción de cobre

En la Figura 4.3 muestra que mineralurgia supone el mayor consumo de energía (28,5 MJ), seguido de la extracción de minerales (23,5 MJ) y del proceso metalúrgico – en esta tesis hemos seleccionado el proceso Intec– (25,7 MJ). Como se puede observar, en total se consume alrededor de 77,8 MJ de energía para producir una tonelada de cobre. Aproximadamente cada una de las tres etapas consideradas consume un tercio de la energía total. Por tanto, se puede afirmar que todas las etapas tienen un peso relativo similar en cuanto a consumo de energía, si bien, como se presentó anteriormente, presentan diferencias significativas en el análisis del impacto del cambio climático y la salud humana.

La Figura 4.4 presenta la demanda de energía acumulada de cada fuente. Debido a que el porcentaje de cada fuente de electricidad se puso según los datos estadísticos de España 2014. Se observa que la energía de los combustibles fósiles representa la mayor parte del consumo total. Además, hemos sabido que los fósiles son no renovables y pueden producir más impacto ambiental. Por lo tanto, si pudiera cambiar la combinación de electricidad para que representaran menos los combustibles fósiles, se podría tener menos impacto ambiental. Y además, la producción de cobre podría ser más sostenible y amigable con el medio ambiente.

En la Figura 4.4, teniendo en cuenta que la extracción del mineral consume más combustibles fósiles, y representa el 42,1% de lo consumido total, seguido de metalurgia de Intec y mineralurgia representan respectivamente el 32,4% y el 25,5%. Se puede observar que la energía nuclear ocupa el segundo lugar del consumo de la energía total. La mineralurgia representa el 46,7%, ya que cuando se hace molienda y flotación de cobre, necesita bastante electricidad. Y entre ellos, la electricidad nuclear juega un papel importante. Además, la metalurgia de Intec y la mineralurgia representan respectivamente 33,5% y 19,8%.

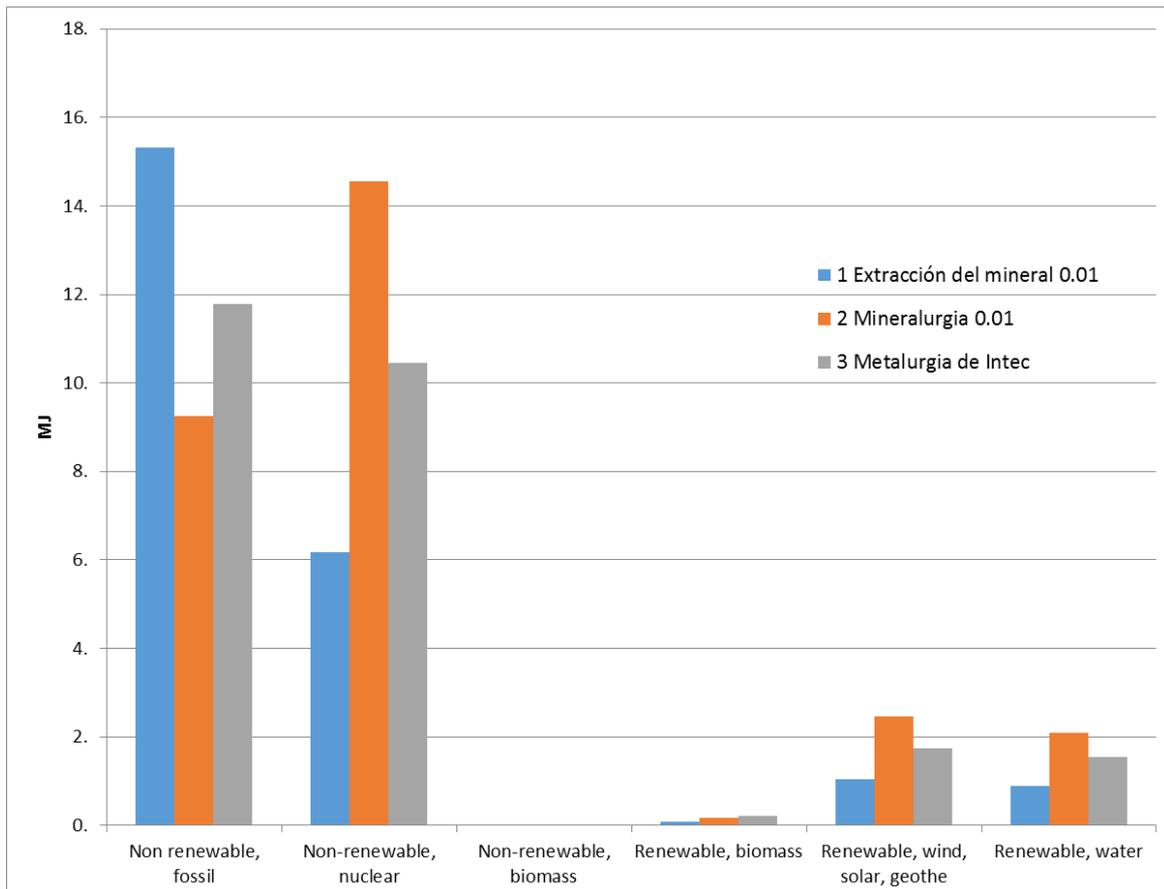


Figura 4.4 Demanda de energía demanda de varias fuentes

4.3 Comparación de las fuentes de electricidad

Debido a la estructura del abastecimiento de electricidad, unos de los impactos ambientales no se evitan, a menos que cambiamos abastecimiento de electricidad. Con este motivo, esta sección vamos a discutir cómo mejora el abastecimiento de electricidad.

Dependiendo del supuesto que se hizo en la sección 3.5, las fuentes de electricidad son los siguientes: Energía hidroeléctrica, Gas Natural Y Crudo, Energía nuclear y Energía eólica. Ahora nuestro objetivo es cambiar el porcentaje de cada fuente para que podamos valorar cuál de las fuentes tiene menos impacto. Además, según la situación real, con ese resultado podremos dar unas recomendaciones.

Para que sea más práctico, elegimos el proceso metalúrgico como el objeto del análisis. Ya que tiene más impacto ambiental que los restos. Además, en la sección 4.1, el cambio climático y la salud humana, agotamiento de fósiles, cambio climático del medio ambiental, formación de partículas y toxicidad humana son los impactos principales, con lo cual el resto se ignora. El resultado se ha mostrado en la Figura 4.5.

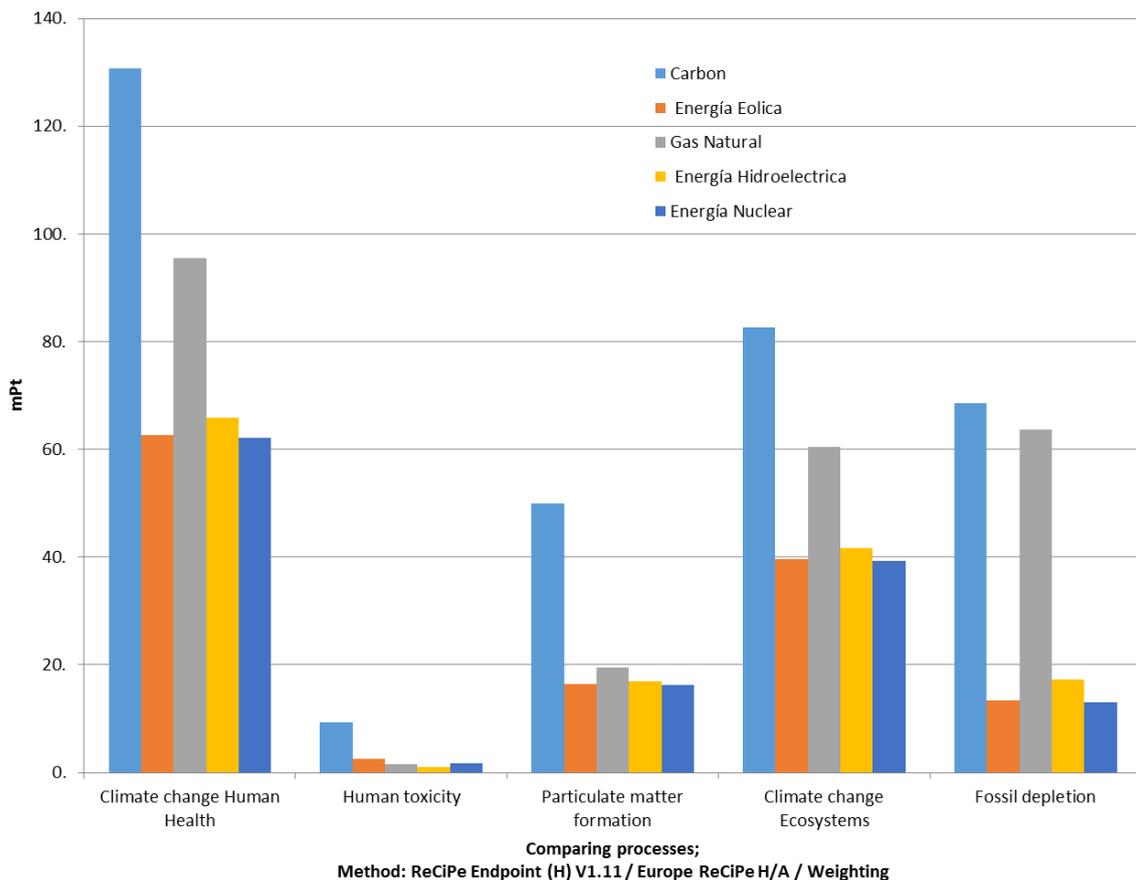


Figura 4.5 Comparación entre las fuentes de electricidad para la metalurgia de Intec

Aparentemente, en la Figura 4.5 se observa que energía eólica, energía hidroeléctrica y energía nuclear tienen menos impacto. En cuanto al impacto del cambio climático y la salud humana, la energía hidroeléctrica supera un poco a la eólica y la nuclear, pero tiene la menor toxicidad humana. Comparado con la nuclear, ya que no tiene radiación.

En referencia al agotamiento de combustibles fósiles, lógicamente los dos tipos de energía fósil –gas natural y carbón– tienen un impacto mucho mayor que el resto. Debido a que gas natural tiene la eficiencia más alta de combustión que carbón, se consume menos. Asimismo, como el producto de la combustión de gas natural solo tiene CO₂ y agua, la formación de partículas solo se produce por la combustión de carbón.

Además, una cosa interesante que se nota en la Figura 4.5 es que generalmente la energía de gas natural tiene más impacto que la eólica, pero en la comparación de toxicidad humana tiene menos impacto. Aunque cuando se genera electricidad, solo se utiliza la energía eólica, a lo mejor es que en la producción se produce algo tóxico.

En resumen, si pudiera utilizar la energía eólica, la hidroeléctrica y la nuclear cuanto posible para producir electricidad, el impacto de la metalurgia de cobre sería menos que ahora, y el impacto de producción también sería menos.

4.4 Comparación de los procesos metalúrgicos

Dependiendo del resultado de la sección 4.1, tenemos en cuenta de que el proceso metalúrgico provoca más impacto ambiental que el resto. En la sección 2.3.3, se han contado 8 tipos del proceso metalúrgico. Para saber cuál de ellos es más sostenible y consume menos energía, se hace un análisis bajo dos metodologías (ReCiPe y CED). Generalmente, si hacen análisis a punto final, tienen 18 categorías. Sin embargo, no todas las categorías tienen la misma importancia. Se hace lo mismo como la sección anterior como se ignoran el resto salvo el cambio climático y la salud humana, agotamiento de fósiles, cambio climático del medio ambiental, formación de partículas y toxicidad humana.

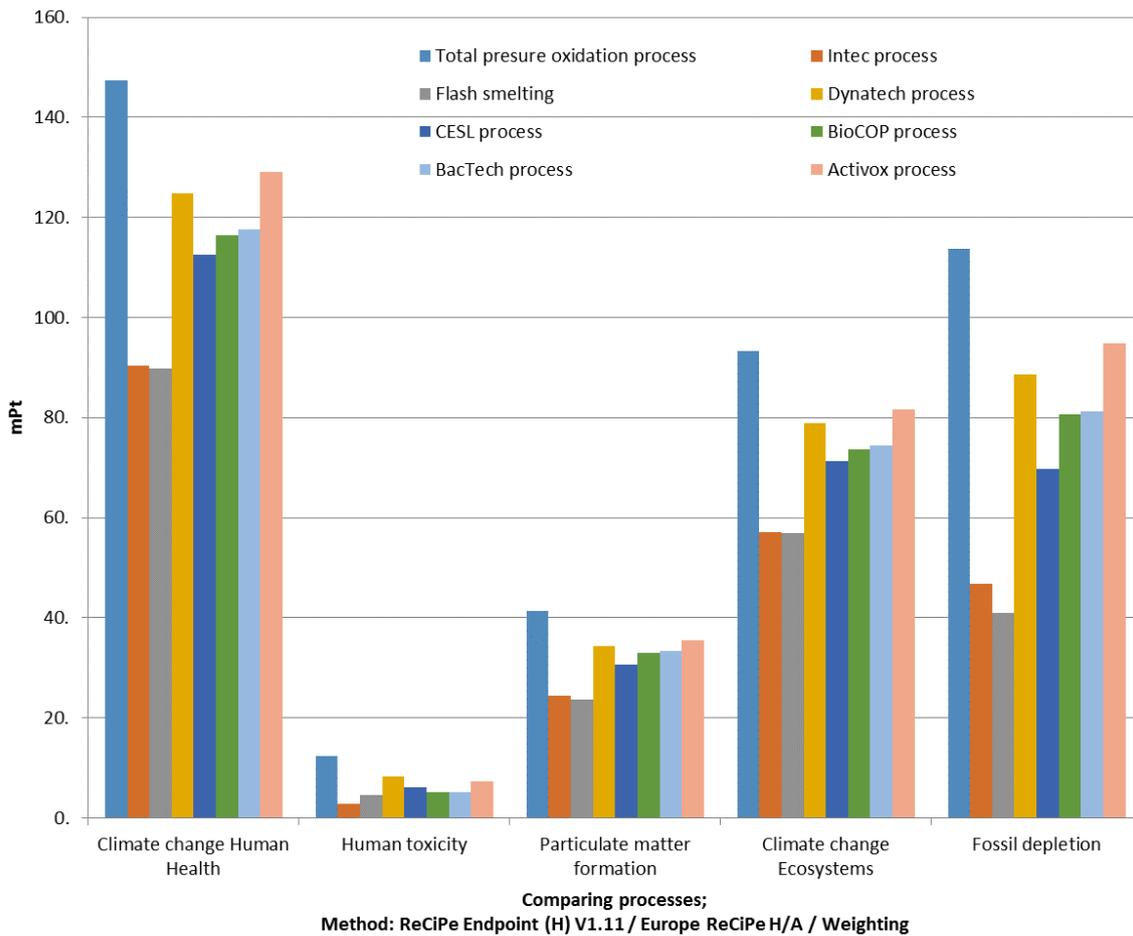


Figura 4.6 Comparación de los procesos metalúrgicos (ReCiPe)

La Figura 4.6 presenta el resultado de la comparación de los procesos metalúrgicos bajo el método ReCiPe. Tal como se puede observar, el cambio climático y la salud humana, que se provoca más comparado con el resto. El segundo es agotamiento de fósiles. La toxicidad humana relativamente es el menor impacto.

Entre los procesos metalúrgicos, el proceso de Intec y la fusión flash, provocan menos impacto ambiental. Y entre cuadro de los cinco impactos la fusión flash tiene menos impacto. Es decir el proceso pirometalúrgico funciona mejor que el hidrometalúrgico. En el análisis del impacto del cambio climático y la salud humana, si suponemos que el valor de impacto ambiental de la fusión flash es 1, el del proceso Intec es 1,006, y los restos, salvo la oxidación a presión total, son de 1,2 a 1,4. La oxidación a presión total tiene el mayor impacto, 1,64. Si se revisa su ambiente de producción (la sección 2.3.3), se puede observar que se necesita una presión alta y estar lleno de oxígeno. Además, se debe hacer bajo una temperatura alta (220°C). Todas estas condiciones consumen más energía y provocan más impacto ambiental. Esta característica también se puede ver en el siguiente análisis.

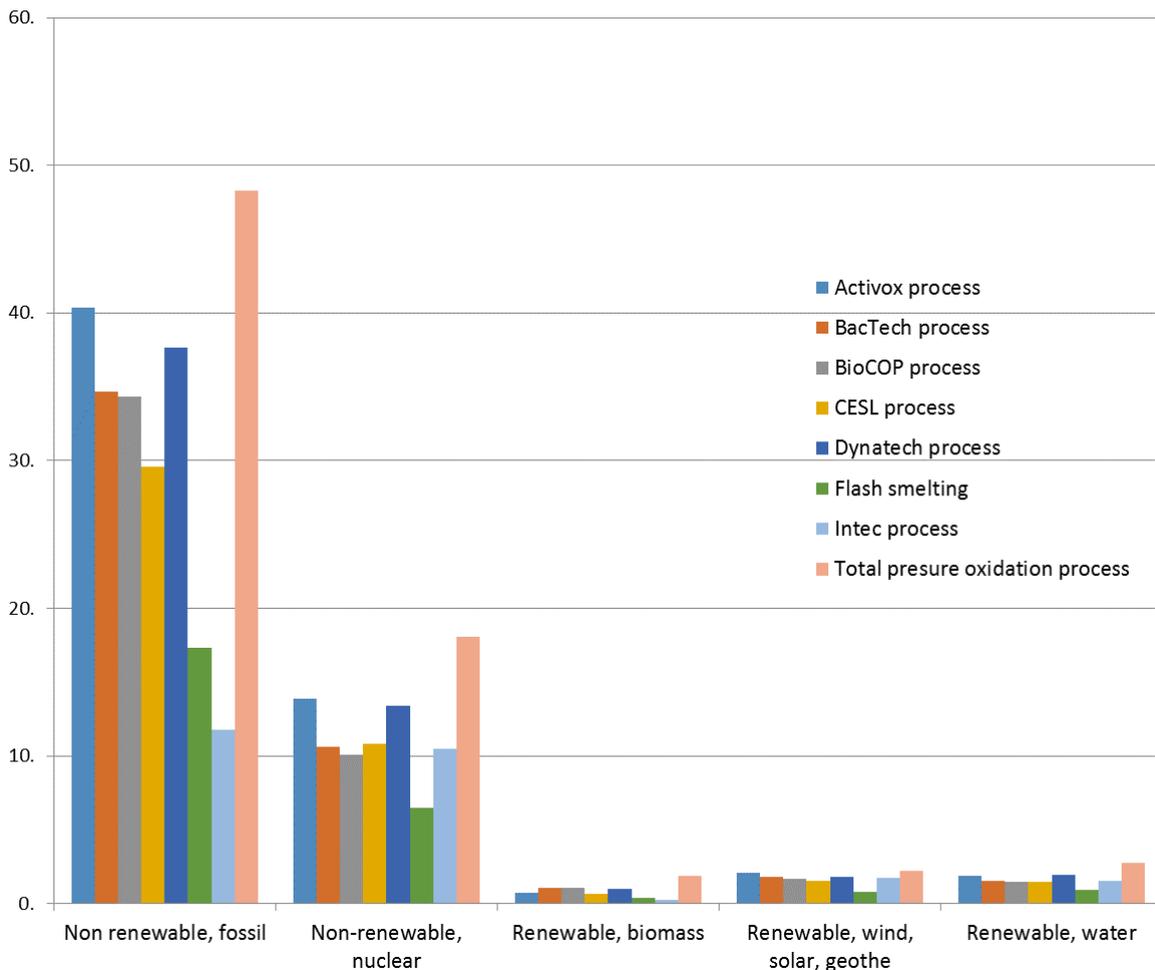


Figura 4.7 Comparación de los procesos metalúrgicos (CED)

La Figura 4.7 muestra que los fósiles representa el mayor consumo energético, seguido de la energía nuclear. Si se comparan los dos procesos metalúrgicos (Intec y fusión flash) que provocan menos impacto ambiental, se puede observar que representan el menor energético. Entre estos dos, el proceso de Intec consume más energía nuclear que la fusión flash, ya que se necesita mucha electricidad para hacer SX-EW. Con esta razón, el de Intec consume más energía eólica y energía hidroeléctrica. Al revés, la fusión flash necesita más recursos fósiles para fundir cobre. Sin embargo, hemos conocido que los fósiles son no renovables. Aparentemente el proceso hidrometalúrgico, sobre todo Intec es la mejor opción para producir cobre.

En resumen, el proceso de Intec es más sostenible que el resto.

4.5 Sensibilidad de la ley de cobre a impacto ambiental

Ley de cobre es el porcentaje de cobre que contiene una determinada muestra. Cuando se habla de una ley del 1% significa que en cada 100 kilogramos de roca mineralizada hay

1 kilogramo de cobre puro. En las últimas dos décadas, la ley promedio de cobre pasó de 1,61% a 0,87%. En el caso de Chile, la ley promedio pasó de 0,78% a 0,68% de los años 2001-2007 (la sección 2.2.2). Como Chile produce la mayoría del mineral de cobre, sus datos se podrán aplicar al caso mundial.

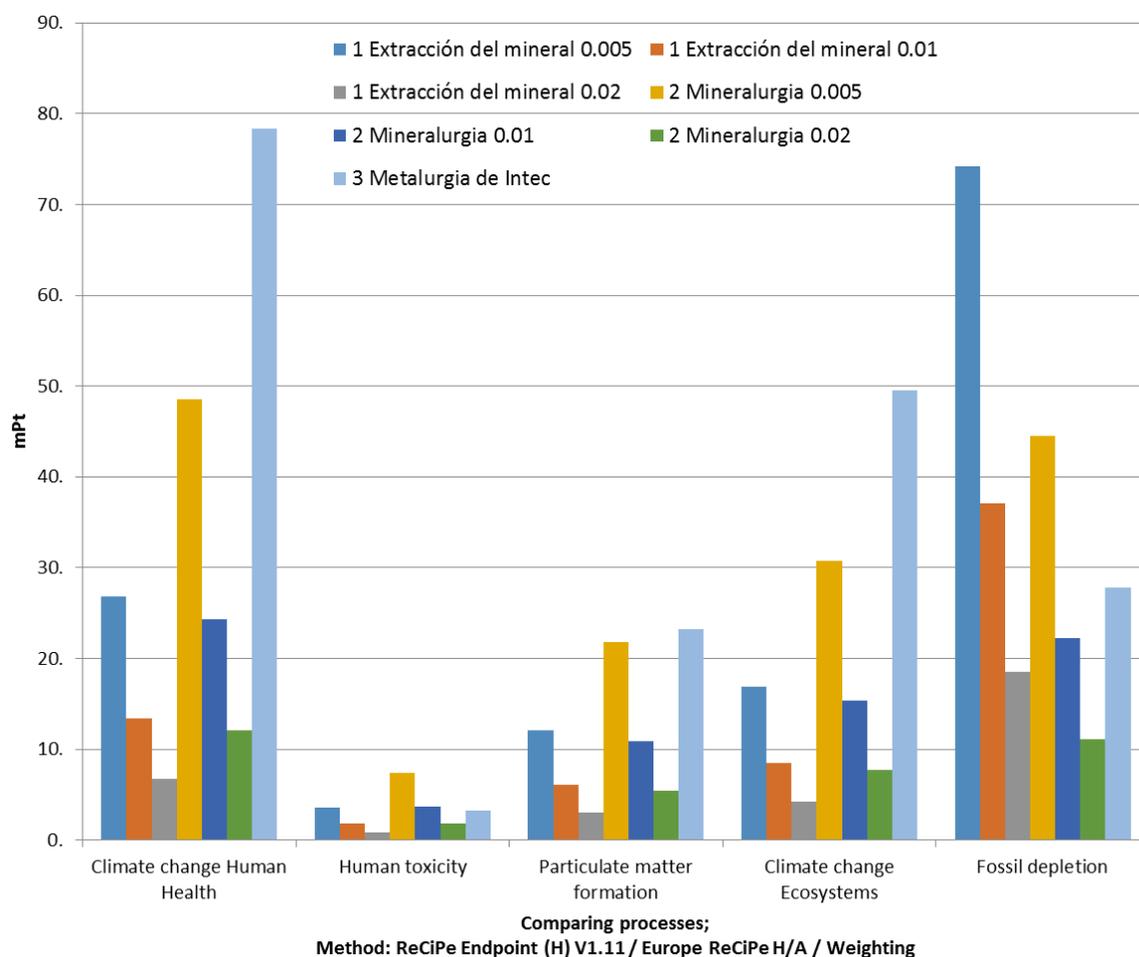


Figura 4.8 Comparación de varias leyes de cobre para el ciclo de vida del cobre (ReCiPe)

En la producción del cobre, la ley desempeña un papel importante. Sobre todo, en la extracción y el tratamiento de minerales. Si la mina tiene una ley alta, significa que tiene menos ganga y no se necesita trasladar tanto. Además, para obtener el mismo volumen de cobre se necesita menos recursos, tales como energía, humano y máquina. Mientras el impacto por cada unidad de cobre es menor.

La Figura 4.8 presenta la comparación de varias leyes de cobre (0.5%, 1% y 2%). Los impactos relativamente menores se han ignorado. Teniendo en cuenta de que el aumento de la ley puede notablemente disminuir impacto ambiental. En el impacto del cambio climático y la salud humana, el proceso metalúrgico representa el mayor impacto. Cuando

la ley es 0.5%, los impactos que se provocan de la extracción del mineral y mineralurgia respectivamente son el 34% y el 62% de lo del metalúrgico. Pero cuando la ley es 2%, este ratio se baja mucho, que son respectivamente 8,5% y 15,5%. Aparentemente, cuando la ley sube, el impacto baja.

Además, si se observa el agotamiento de fósiles y la toxicidad humana, se nota cuando la ley es 0,5%, estos dos impactos se provocan por la extracción del mineral y por la mineralurgia son mayores que el por el proceso metalúrgico. Pero cuando la ley sube hasta 2%, se cambian y esos dos impactos son menores que el por el proceso metalúrgico. Si se analiza el impacto de la formación de partículas, el resultado es lo mismo.

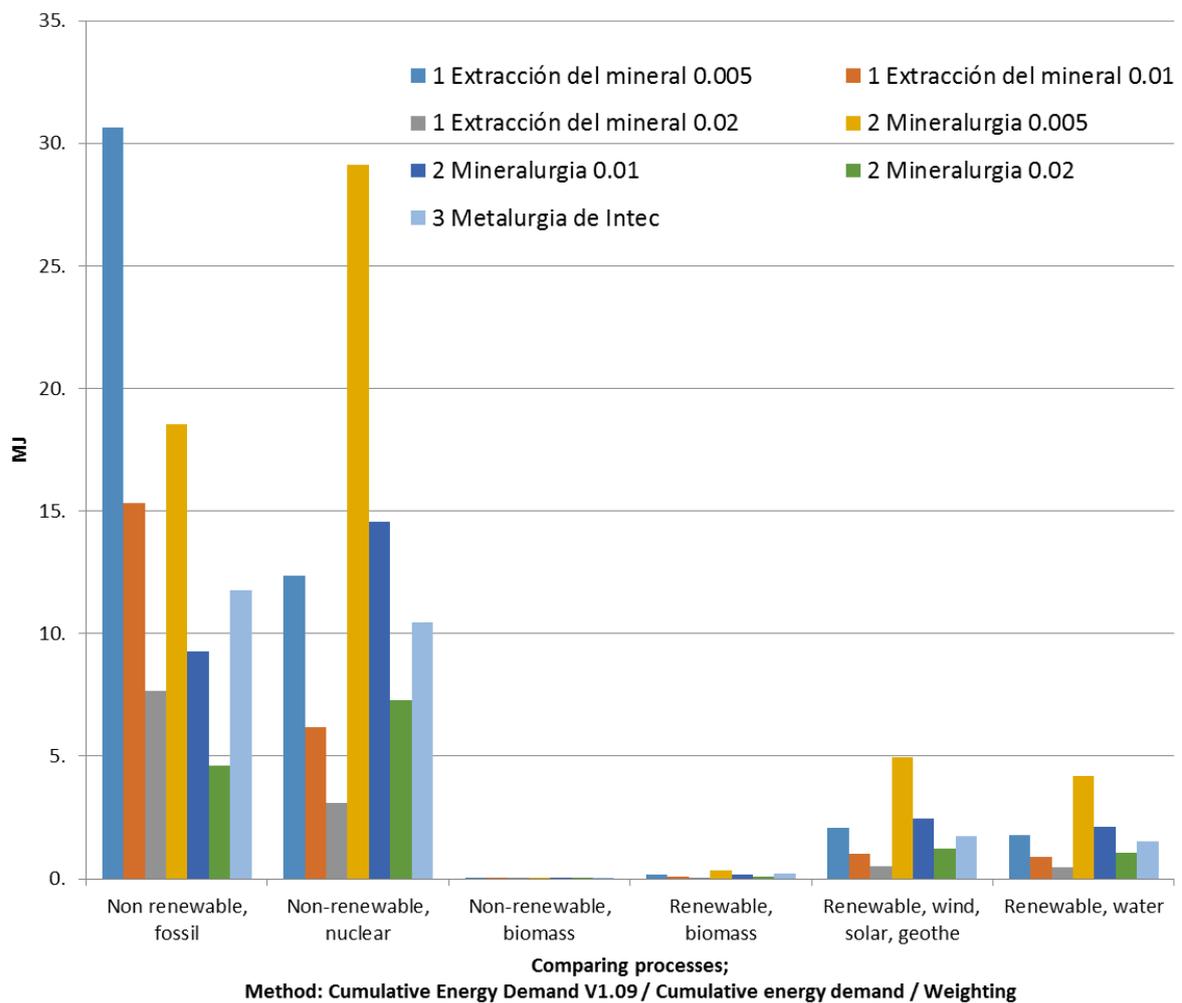


Figura 4.9 Comparación de varias leyes de cobre para el ciclo de vida del cobre (CED)

Tras calcular la metalurgia de Intec por el método CED, se puede obtener todas las demandas de energía acumulada de cada ley. El resultado es parecido a lo que hemos analizado en la sección 4.2. Los combustibles fósiles y la energía nuclear ocupan

respectivamente el primer y segundo lugar del consumo de energía. Los impactos relativamente menores se han ignorado. Para que se vean mejor los resultados, se hace una tabla que se ha mostrado abajo.

Tabla 4.1 Porcentaje de las demandas de energía acumulada de cada ley

Tipología	Extracción			Mineralurgia			Metalurgia de Intec		
	0,005	0,01	0,02	0,005	0,01	0,02	0,005	0,01	0,02
No renovable, fósiles	50,3%	42,1%	31,8%	30,4%	25,5%	19,2%	19,3%	32,4%	48,9%
No renovable, nuclear	23,8%	19,8%	14,9%	56,1%	46,7%	35,0%	20,1%	33,5%	50,2%
Renovable, viento, solar, etc.	23,7%	19,8%	14,8%	56,3%	46,9%	35,2%	20,0%	33,3%	50,0%
Renovable, agua	23,9%	19,8%	14,8%	55,7%	46,2%	34,5%	20,5%	34,0%	50,7%

En la Tabla 4.1 se puede observar que en los procesos de la extracción y la mineralurgia el consumo de energía de cualquier fuente disminuye cuando la ley sube. Por ejemplo, cuando la ley es 0,005, la extracción representa el 50,3% del consumo total. Pero cuando la ley sube hasta 0,02, se nota que el porcentaje ya es solo 31,8%.

Sin embargo, se puede observar que el porcentaje de metalurgia de Intec sube cuando la ley sube. Ya que la ley no influencia el proceso metalúrgico, que solo depende del porcentaje del concentrado de cobre. Por lo tanto, cuando la ley sube, el consumo de otras etapas disminuye, el porcentaje de la metalurgia sube. Pero con ese caso, no se necesita preocupar mucho, se podrá ajustar la tipología del abastecimiento de electricidad como lo que se ha comentado en la sección 4.3.

En realidad, con la explotación de cobre, la ley de mina de cobre es cada vez más baja. Si no cambiara el método de explotación y mineralurgia, se provocaría más impacto ambiental por culpa de la disminución de la ley.

Con la disminución de la ley de cobre, el impacto de su producción aumenta. De acuerdo con los resultados obtenidos, al pasar de una ley del 1% al 0,5%, el impacto de los procesos de extracción y metalúrgicos se duplica.

5 Conclusiones

Por una serie de análisis del ciclo de vida, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- En el ciclo de vida del cobre, hay cinco impactos, representan el 97,2% de todos los impactos, que son mayores que el resto. El primero es el impacto del cambio climático y la salud humana (34,6%), seguido del agotamiento de fósiles (26,0%), el cambio climático del medio ambiental (21,9%), la formación de partículas (12,0%), la toxicidad humana (2,6%).
- En general, el proceso metalúrgico representa más porcentaje del impacto total, excepto el de agotamiento de fósiles, en el que la extracción del mineral representa más.
- Cuando la ley de la mina de cobre es 1%, los consumos de energía de las 3 etapas (La extracción, la mineralurgia y la metalurgia) no varían mucho, respectivamente son 23,5 MJ, 28,5 MJ y 25,7 MJ para producir un kilo de cobre puro (99,9% Cu).
- Por el análisis de las demandas de energía acumulada de cada etapa, la energía de los combustibles fósiles representa el 46,7% del consumo total, seguido de la energía nuclear, que representa el 40,1%.
- La energía eólica, energía hidroeléctrica y energía nuclear tienen menos impacto que el resto. Si pudiera utilizar la energía eólica, la hidroeléctrica y la nuclear cuanto posible para producir electricidad, el impacto de la metalurgia de cobre sería menos que ahora, y el impacto de producción también sería menos.
- El proceso Intec es un método metalúrgico más sostenible que el resto. La oxidación a presión total tiene el mayor impacto, es 1,64 veces que lo que se provoca la fusión flash, mientras que el proceso Intec es 1,006.
- Con la disminución de la ley de cobre, el impacto de su producción aumenta. De acuerdo con los resultados obtenidos, al pasar de una ley del 1% al 0,5%, el impacto de los procesos de extracción y metalúrgicos se duplica.

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresarme más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Alejandro Josa Garcia-Tornel y Dr. Alfonso Rodríguez Dono, por la orientación, el seguimiento y la supervisión, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este año.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis amigos, Daniel Muñoz Arenas y David Lorente Palacín, por la revisión y la recomendación.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.

A todos ellos, muchas gracias.

Referencias

ACARP (Australian Coal Association Research Program), LCA of steel and electricity production. Project C8049, 2000.

Barta, L., Buban, K., Stiksmá, J. and Collins, M. Pressure leaching of chalcopyrite concentrates by Dynatech. Proceedings of Copper 99 Conference, Vol . IV, pp. 167-180.

Biswas, A. and Davenport, W. Extractive Metallurgy of Copper, Third edition, 1994, (Pergamon, UK).

Briem, S., Alkan, Z., Quinkertz, R., Dienhart, M. and Kugeler, K. Development of energy demand and energy-related CO₂ emissions in melt electrolysis for primary aluminium production. Aluminium, 2000, Vol 72, pp.502-506.

Brook Hunt Copper Costs: Mines and Projects, 2000. Buban, K. and Collins, M. Acid pressure leaching of chalcopyrite by Dynatech. Randol Copper Hydromet Rountable, 1997.

Carvalho, F. and Bizzo, W. Evaluation of greenhouse gas emissions associated with electric power generation in Brazil. Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-5), Cairns, Australia, 2000.

Collins, M., Stiksmá, J., Buban, K. and Masters, I. Pressure acid leaching of zinc and copper concentrates by Dynatech. Proceedings of EPD Congress, 2000, pp. 597-605.

Corrans, I., Angove, J. and Johnson, G. The treatment of refractory coppergold ores using Activox processing. Randol Gold Forum, Perth , 1995, pp. 221-224.

Cowen, R. "Essays on Geology, History, and People, Chapter 3: "Fire and Metals: Copper". Disponible en: <http://t.cn/Rz0WCDr>

CRESTA (Centre for Risk, Environment, Systems Technology and Analysis), Department of Chemical Engineering, University of Sydney. INTEC Copper Process: Environmental Technology Assessment, December 2000.

Dew, D., Van Buuren, C., McEwan, K. and Bowker, C. Bioleaching of base metal sulphide concentrates: A comparison of high and low temperature bioleaching. J. of South African Inst. of Min. & Met., Nov/Dec 2000, pp. 409- 413.

Dreisinger, D. The INTEC Copper Process: A Review of Technical and Financial Feasibility. Final report prepared for INTEC Ltd., November 1998.

Dreisinger, D. The total pressure oxidation process. TMS Copper Hydrometallurgy Short Course (Copper 99), October 1999.

Dreisinger, D. and Saito, B. The total pressure oxidation of El Indio Ore and concentrate. Proceedings of Copper 99 International Conference, 1999, Vol. IV, pp. 181-195.

Evans, H. The Activox copper process. TMS Copper Hydrometallurgy Short Course (Copper 99), October 1999.

Evans, H. E-mail to M. Hooke (Intec Ltd.) of 30/3/2001. Gonzalez, C. and Ruiz, C. 1991. Chuquicamata flash smelting project. Proceedings of Copper 91 International Conference, p.31.

Griffin, I., Hart, S., Espinosa-Gomez, R. and Johnson, N. Chalcopyrite flotation and liberation characterisation before and after autogeneous grinding at Mount Isa Mines Limited. Proceedings of XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, 1993, p. 913.

Informe Principales Decisiones de Chuquicamata. Codelco. Marzo de 2009.

Hong, S., Candelone, J.-P.; Patterson, C. C.; Boutron, C. F. "History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice". *Science* 272 (5259): 246–249 (247f.). 1996.

Houllis, F. (Intec Ltd.) Personal communication (August 2001).

Ishikawa, M. High-intensive operation and productivity increase of flash smelting furnace at Saganoseki smelter and refinery, *Metallurgical Review of MMIJ*, 2, 1998, p. 139.

Jenkins, J., Davenport, W., Kennedy, B. and Robinson, T. Electrolytic copper - leach, solvent extraction and electrowinning world operating data. Proceedings Copper 99, Vol. IV, pp. 493-566.

Jones, D. The CESL copper process. TMS Copper Hydrometallurgy Short Course (Copper 99), October 1999.

Jones, D. CESL copper process. ALTA Copper Hydrometallurgy Forum, Brisbane, October 1996.

Jones, D. and Hestrin, J. CESL process for copper sulphides: Operation of the demonstration plant, ALTA Copper Sulphides Symposium, Brisbane, October 1998.

Jones, D. E-mail to T. Norgate (CSIRO) of 25/9/2001.

Juan Salvat. Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 4 Cobre. Salvat Editores S.A. ISBN 84-345-4490-3. 1984.

King, J. and Dreisinger, D. Autoclaving of copper concentrates. Proceedings of Copper 95 Conference, Vol. III, p. 511.

King, J., Dreisinger, D. and Knight, D. The total pressure oxidation of copper concentrates. The Paul E. Queneau International Symposium: Extractive Metallurgy of Copper Nickel and Cobalt, 1993, pp. 735-756.

Kojo, I. and Hanniala, P. Non-polluting metal production network. Proceedings of Greenhouse Gases in the Metallurgical Industries Symposium, COM2001 (Met. Soc.), Toronto, 2001, pp. 397-408.

Krag, P., Imrie, W. and Berkoe, J. 1993. Anode furnace practice for high sulphur blister, in *Converting, Fire Refining and Casting*, pp. 255-267 (The Minerals, Metals and Materials Society).

Loayza, C., Dew, D., Marals, H. and van Aswegen, P. Bio-oxidation of gold and copper concentrates from Peru. Paper presented at International Gold Conference, Lima, Peru, May 1996.

Lynch, Martin. *Mining in World History*. p. 60. ISBN 978-1-86189-173-0. Abril de 2004.

Martin, Susan R. "The State of Our Knowledge About Ancient Copper Mining in Michigan". *The Michigan Archaeologist* 41 (2-3): 119. 1995.

Marianne Stanczak. A Brief History of Copper [en línea]. CSA. Octubre de 2005. Disponible en: <http://t.cn/Rz09ksu>

McKee, D., Fewings, J., Manlapig, E. and Lynch, A. Computer control of chalcopyrite flotation at Mount Isa Mines Limited, in *Flotation: A M Gaudin Memorial Volume*, 1976, 2, p. 994 (Am Inst Min Met & Pet Soc Inc).

McNeil, Ian. *Encyclopaedia of the History of Technology*. London; New York: Routledge. pp. 13, 48-66. ISBN 0-203-19211-7. 2002.

Miller, P. and Winby, R. The potential commercialisation of bioleaching for the treatment of chalcopyrite ores and concentrates. Paper presented at SME meeting, Denver, Colorado, 1997.

Miller, P. Bacterial leaching of copper concentrates. TMS Copper Hydrometallurgy Short Course (Copper 99), October 1999.

MIM (Mount Isa Mines Limited) Report to shareholders, 1998.

Norgate, T. E. and Rankin, W.J. Life Cycle Assessment of copper and nickel production. MINPREX 2000 Conference, Melbourne, September 2000, (The AusIMM), pp. 133-138.

Norgate, T E. A Comparative Life Cycle Assessment of Copper Production Processes. Intec Ltd. 2001.

Paschen, P., Langfellner, M. and Mori, G. 1991. Productivity increase and energy conservation in copper electrowinning. Proceedings of Copper 91 International Conference, pp. 575-591.

Pleger, Thomas C. "A Brief Introduction to the Old Copper Complex of the Western Great Lakes: 4000–1000 BC", Proceedings of the Twenty-seventh Annual Meeting of the Forest History Association of Wisconsin, Oconto, Wisconsin, pp. 10–18, 5 October 2002.

Radivojević, Miljana; Rehren, Thilo. "Tainted ores and the rise of tin bronzes in Eurasia, c. 6500 years ago". Antiquity Publications Ltd. Diciembre de 2013. Disponible en: <http://t.cn/Rz0lr2g>

Rayner W. Hesse. Jewellerymaking through History: an Encyclopedia. Greenwood Publishing Group. p. 56. ISBN 0-313-33507-9. 2007.

Renfrew, Colin. Before civilization: the radiocarbon revolution and prehistoric Europe. Penguin. ISBN 978-0-14-013642-5. 1990.

Rich, D. Smelting Practice at Olympic Dam. The AusIMM Centenary Conference, Adelaide, 1993, pp. 207-215.

Richard Floody. Codelco Educa. Trabajo geológico de yacimiento [en línea]. 2012.

Rio Tinto Data Book, 2000 (www.riotinto.com)

Stelter, M.; Bombach, H. Process Optimization in Copper Electrorefining. Advanced Engineering Materials 6 (7): 558. Doi: 10.1002/adem. 200400403.

Timberlake, S. and Prag A.J.N.W. The Archaeology of Alderley Edge: Survey, excavation and experiment in an ancient mining landscape. Oxford: John and Erica Hedges Ltd. p. 396. 2005.

Vonk, A. Copper concentrator practice at The Olympic Dam Joint Venture, Roxby Downs, SA. Australasian Mining and Metallurgy, (Eds: J. Woodcock and J. Hamilton), 1993, Vol 1, pp. 656-658 (The AusIMM).